

Измерительные системы на ВТСП СКВИДах

М.И.Фалей^{1,2}, Ю.В. Масленников^{1,3} и В.П.Кошелец¹

¹*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 101999, Москва*

²*Исследовательский центр Юлих, Германия*

³*ООО “НПО КРИОТОН” 142190, Троицк, Московская область*

Разработаны измерительные системы на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИДов) для неразрушающего контроля материалов, магнитной микроскопии и биомагнитных исследований. Применение СКВИДов на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП СКВИДов) позволило при сохранении чувствительности увеличить их рабочую температуру с 4.2 К до 77.4 К и использовать более тонкую и менее шумящую теплоизоляцию. Система для неразрушающего контроля материалов с тонкопленочным СКВИД-градиометром стабильно работала в магнитно-неэкранированном пространстве с чувствительностью около 15 фТ/см \sqrt Гц, достаточной для детектирования магнитных частиц размером около 10 мкм на расстоянии около 15 мм. Магнитные микроскопы на автономных ВТСП СКВИДах с ферромагнитной антенной магнитного потока показали чувствительность по магнитному полю около 1 пТ/ \sqrt Гц и пространственное разрешение около 1 мкм. Система для биомагнитных измерений продемонстрировала достаточную чувствительность для применений в магнитокардиографии и магнитоэнцефаллографии.

Measuring systems based on superconducting quantum interferometers (SQUIDs) for nondestructive testing of materials, magnetic microscopy and biomagnetic research were developed. The use of SQUIDs based on films of high temperature superconductors (HTc SQUID) made it possible to increase the sensitivity while maintaining their operating temperatures from 4.2 K to 77.4 K and a more subtle and less noisy insulation. System for nondestructive testing of materials with thin-film SQUID gradiometer operated stably in the magnetically unshielded space with sensitivity of about 15 fT/cm \sqrt Hz, which was sufficient for detection of magnetic particles measuring about 10 μ m at a distance of about 15 mm. Magnetic microscope based on autonomous HTc SQUID with a ferromagnetic antenna has shown the magnetic field sensitivity of about 1 nT/ \sqrt Hz and a spatial resolution of about 1 micron. System for biomagnetic measurements demonstrated sufficient sensitivity for application in magnetocardiography and magnetoencephalography.

Введение

Системы на основе сверхпроводниковых квантовых интерферометров (СКВИДов) используются во множестве научных экспериментов для проведения высокочувствительных измерений в широком диапазоне частот от 1 Гц до 1 ГГц [1, 2]. СКВИДы регистрируют проходящий через него поток магнитного поля Φ с коэффициентом преобразования $\partial V/\partial\Phi > 10^{10}$ вольт/вебер в выходное напряжение V и служат для измерения трансформируемых в магнитный поток физических характеристик. Наиболее широкое распространение СКВИДы получили в измерительных системах для радиоастрономии, для неразрушающего контроля и измерений магнитных свойств материалов, магнитной микроскопии микроструктур и электрических микросхем, в измерительных системах для геомагнитных и биомагнитных исследований.

Применение СКВИДов на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП СКВИДов) позволило увеличить их рабочую температуру с температуры жидкого гелия 4.2 К до температуры кипения жидкого азота 77.4 К. Благодаря тому, что теплота испарения жидкого азота (161 кДж/литр) значительно выше теплоты испарения жидкого гелия (2.68 кДж/литр) в криостатах сравнимых размеров скорость испарения жидкого азота оказывается на порядок меньше скорости испарения жидкого гелия. Кроме того, использование криогенной жидкости и/или криокулеров проще и дешевле при рабочей температуре 77 К чем при 4.2 К. При этом чувствительность измерительных систем на ВТСП СКВИДах в некоторых случаях оказывается не хуже аналогичных систем работающих при гелиевых температурах, главным образом, благодаря возможности использования более тонкой и менее шумящей теплоизоляции в ВТСП системах. Использование жидкого азота в качестве охладителя упрощает поддержание СКВИД систем в рабочем состоянии, что расширяет область их применения от единичных лабораторных систем до измерительных систем, работающих также в промышленных и полевых условиях.

Разработанные и произведенные одним из авторов в Исследовательском центре г. Юлих (Германия) ВТСП СКВИДы [3, 4, 49] были с успехом опробованы в измерительных системах для геомагнитных исследований [5, 6], для проверки целостности железной арматуры в железобетонных конструкциях [7], для проверки на наличие скрытых трещин во внутренних слоях обшивки самолетов и внутри ободов самолетных колес [8], исследованиях целостности армированных углеродной тканью пластиковых конструкций [9], при бесконтактном тестировании полупроводниковых структур с помощью лазерного СКВИД микроскопа [10, 11] а также для дистанционного измерения параметров радиоизотопных пучков в ускорителях [12, 13]. В данной работе проведен краткий обзор измерительных систем на основе ВТСП ПТ-СКВИД

магнитометров и градиометров, главным образом, систем для неразрушающего контроля материалов, магнитной микроскопии и биомагнитных исследований.

1. Измерительные системы для неразрушающего контроля материалов

Множество потенциальных применений СКВИДов относятся к неразрушающему контролю материалов. В данном случае СКВИД-системы могут быть использованы для дистанционного измерения магнитных аномалий в технических материалах и инженерных конструкциях на их основе. Практический интерес представляет, в частности, тестирование многослойных конструкций где стандартные методы неразрушающего контроля типа ультразвуковой диагностики имеют ограниченные возможности применения. При так называемом активном тестировании зондирующий сигнал приводит к возбуждению магнитного отклика в исследуемом объекте. В качестве примеров можно привести зондирование вихревыми токами обшивки самолетов и проверку целостности арматуры железобетонных конструкций методом их намагничивания. Основным преимуществом СКВИДов для данных применений является их большой динамический диапазон (~ 120 дБ) и относительно высокая чувствительность на низких частотах, что позволяет зондирование на бóльшую глубину и в присутствии сильных фоновых сигналов, например, от ферромагнитных деталей. Чувствительность СКВИДа без сверхпроводящего трансформатора потока ~ 10 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ оказывается достаточной для данных измерений: при амплитуде зондирующего сигнала ~ 10 мТл возможно измерение отклика амплитудой 1 нТл с отношением сигнал-шум ~ 100 .

Большое значение при неразрушающем контроле материалов имеет также пассивное дистанционное детектирование слабых магнитных сигналов от магнитных неоднородностей или примесей в конструкционных материалах. В частности, разработка и изготовление чувствительных систем измерения магнитных характеристик требует регулярного контроля используемых конструкционных материалов (в основном, стеклопластиковых деталей) на наличие магнитных примесей. Наличие магнитного загрязнения вблизи чувствительного элемента деградирует шумовые свойства системы и увеличивает нежелательную чувствительность системы по отношению к вибрациям. Источником такого магнитного загрязнения может служить, например, пыль, содержащая иногда мельчайшие частицы магнитных соединений железа, кобальта или никеля. Частицы размером до ~ 100 микрон могут задерживаться в микротрещинах, под поверхностью и в неоднородностях конструкционных деталей измерительной системы и оставаться таким образом необнаруживаемыми при стандартном визуальном контроле. Измерительная система для таких рутинных инспекций должна обеспечивать необходимое

разрешение на расстоянии в несколько сантиметров от таких магнитных частиц, не требовать особого внимания на поддержание ее в рабочем состоянии и стабильно функционировать в магнитно-неэкранированных лабораторных условиях. Представленная в данном разделе градиометрическая ВТСП СКВИД система была использована для различных измерений в лабораторных условиях без использования магнитной экранировки [14, 50].

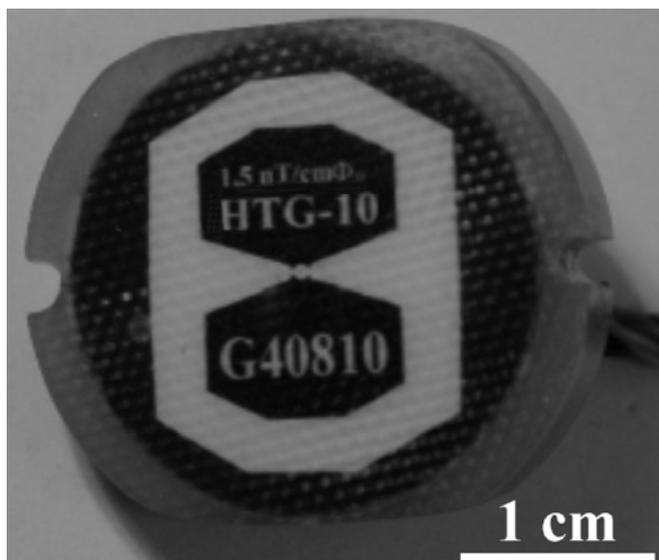


Рис. 1. Фотография закапсулированного ВТСП СКВИД градиометра с многослойным трансформатором потока и длиной базы около 1 см.

Планарный ВТСП ПТ-СКВИД градиометр (рис. 1) с длиной базы около 1 см дает возможность проводить чувствительные измерения в условиях сильных магнитных шумов на расстояниях (1-10) см от датчика до исследуемого объема и поэтому представляется наиболее подходящим для детектирования данных примесей. В градиометре использовались бикристаллические переходы шириной 1 микрометр, изготовленные на симметричных 24° бикристаллах SrTiO_3 (100) посредством стандартной фотолитографии с AZ5214 фоторезистом и ионным травлением. Тонкопленочный сверхпроводящий трансформатор потока градиометра имел градиометрическую приемную катушку диаметром 25 мм и 14-ти витковую катушку связи диаметром около 1 мм, расположенную в центре градиометра. Градиометр был вакуумно-плотно закапсулирован в стеклопластиковом корпусе вместе с платиновым термометром-нагревателем и медной катушкой, используемой для модуляции и обратной связи.

Расположенный на торце стеклопластиковой вставки ВТСП градиометр прижимался к внутренней поверхности дна азотного стеклопластикового криостата НПО «КРИОТОН»

параллельной горизонтальной плоскости x, y . Направление оси x системы координат измерений было выбрано вдоль базы градиометра. Криостат имел высоту 60 см и вмещал 1.5 литра жидкого азота. Была продемонстрирована стабильная работа измерительной системы с данным стеклопластиковым криостатом в течение времени более недели без долива жидкого азота. Для более универсальной работы данной измерительной системы магнитная экранировка криостата и образцов не применялась.

Использование СКВИДов в магнитно-неэкранированном объеме обычно сталкивается с проблемой выделения исследуемого сигнала на фоне значительно бóльших внешних помех. Так, например, типичная величина магнитного сигнала 50 Гц в лаборатории составляет около 100 нТ, а уровень магнитного сигнала от общественного транспорта в городских условиях часто превышает 1 мкТ. При вибрациях, перемещении и, в особенности, вращении сенсора в магнитном поле Земли амплитуда изменения поля может достигать величины порядка 100 мкТ. Все это накладывает строгие требования на динамический диапазон, линейность и быстродействие СКВИД электроники в случае использования магнитометрических сенсоров.

Для выделения полезного сигнала в присутствии большого и однородного в пространстве фонового сигнала используются градиометрические схемы в виде а) вычитания выходных сигналов магнитометров (электронный градиометр) один из которых является референсным и расположен достаточно далеко от исследуемого объекта или б) вычитание фонового сигнала непосредственно в трансформаторе потока СКВИДа за счет градиометрической конфигурации приемной катушки. В первом случае возможно произвольное взаимное расположение магнитометров, но одновременно возникает множество проблем, связанных с имеющимися ограничениями по динамическому диапазону, линейности и быстродействию магнитометров и электроники. Во втором случае, наоборот, основной проблемой является существенные ограничения на взаимное расположение петель градиометрической приемной катушки, так как в случае ВТСП трансформаторов потока обе петли расположены на одной монокристаллической подложке, образуя планарный градиометр. Размер и чувствительность планарного ВТСП градиометра ограничены размером монокристаллической подложки. При использовании многослойного многovitкового трансформатора на подложке диаметром 30 мм в работе [6] удалось достигнуть чувствительности около $30 \text{ фТ/см}\sqrt{\text{Гц}}$ на частотах выше 10 Гц и около $100 \text{ фТ/см}\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц.

Присутствующее в городских условиях электромагнитное излучение способно нарушить стабильность работы и ухудшить чувствительность СКВИДов [15]. Чтобы избежать данной деградации характеристик СКВИДа требуется обеспечивать тщательное высокочастотно-плотное электромагнитное экранирование. Для защиты от электромагнитных помех частотой выше

~ 40 кГц была использована высокочастотная экранировка криостата, имеющая уровень собственных тепловых магнитных шумов менее 30 фТл/√Гц в области детектора. Весь криостат был обернут в алюминиевую фольгу толщиной $d \sim 10$ мкм. Благодаря скин-эффекту в алюминии данной толщины наведенные токи экранируют внутренний объем от электромагнитных наводок частотой свыше ~ 40 кГц. Фольга заземлялась последовательно через оплетку кабеля и корпус СКВИД электроники.

Радиочастотная экранировка улучшила стабильность и шумовые характеристики системы при работе в неэкранированном помещении. Однако шумы системы несколько превосходили шумы, измеренными при помещении датчика в сверхпроводящий экран. В области белого шума это различие объясняется тепловыми шумами фольги. В месте расположения градиометра амплитуда B_N магнитного шума, обусловленного тепловыми шумовыми токами в алюминиевой фольге, составляет ~ 20 фТл/√Гц согласно уравнению ([16] и [17]):

$$B_N = \frac{1}{2} \mu_0 \sqrt{\frac{kT}{2\pi\rho} \frac{d}{z(z+d)}} \quad , \quad (1)$$

где $\rho \sim 2.7 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление алюминия, а $z \sim 15$ мм – расстояние между фольгой и градиометром, определяемое толщиной капсулы градиометра и толщиной дна криостата. Толщина дна криостата составляла ~ 10 мм и была обусловлена наличием множества слоев покрытых алюминием майларовых пленок, выполняющих роль радиационных экранов. При использовании градиометра с разрешением ~ 40 фТл/см√Гц шумы фольги увеличивают шумы системы на приемлемую величину ~ 10 %.

В типичных лабораторных условиях имеется магнитный шум амплитудой до нескольких микротесла на частотах ниже 1 кГц. Для проведения чувствительных измерений без магнитной экранировки необходимо использовать хорошо сбалансированный градиометр и фильтровать выходной сигнал от наводки сетевой частоты и ее гармоник. Благодаря градиометрической конфигурации приемной катушки СКВИДа значительная часть внешних шумов автоматически вычитается, что значительно упрощает требования для СКВИД электроники по быстродействию и динамическому диапазону. Баланс градиометра ~ 1400 был достигнут посредством дополнительной коррекции с помощью отрезка пермаллоевой фольги размером 1 см x 5 см, зафиксированного на внешней поверхности криостата. Для фильтрации выходного сигнала СКВИД электроники также использовался синхронный фильтр производства НПО «КРИОТОН», позволяющий подавить паразитные сигналы сетевой частоты и ее гармоник улучшив, таким образом, на два порядка отношение сигнал/шум градиометра.

Рутинные проверки конструкционных материалов (стеклопластиковых и медных деталей, криостата, кабелей, вставки и других) с помощью ВТСП СКВИД системы были проведены в магнитно-неэкранированной лабораторной обстановке. Находящейся в руке деталью просто проводили под дном криостата и наблюдали отклик градиометра на экране осциллографа. Такое сканирование является наиболее быстрым и простым тестом на наличие в образцах различных форм и размеров малых магнитных частиц и других загрязнений. При этом чувствительность ВТСП СКВИД системы на более чем два порядка величины превосходила разрешение других измерительных систем, например, основанных на феррозонде (флакстейте).

С помощью ВТСП СКВИД системы были обнаружены и локализованы с миллиметровой точностью магнитные частицы размером до нескольких микрон. Также оказалось возможным определить величину магнитного дипольного момента этих магнитных частиц. Количественный анализ данных сканирования был проведен на основании формулы распределения магнитного поля \vec{B} [Т] магнитного диполя:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{P}\vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{P}}{r^3} \right], \quad (2)$$

где \vec{P} [А·м²] – магнитный момент диполя, а \vec{r} [м] – расстояние от диполя до точки измерений. Для магнитного момента перпендикулярного плоскости градиометра измеренный сигнал описывается следующей зависимостью:

$$\frac{\partial B_z}{\partial x}(x, y=0) = \frac{3\mu_0 x(x^2 - 4z^2)P}{4\pi(x^2 + z^2)^{7/2}}, \quad (3)$$

тогда как для случая \vec{P} параллельного оси сканирования x (рис. 2):

$$\frac{\partial B_z}{\partial x}(x, y=0) = \frac{3\mu_0 z(z^2 - 4x^2)P}{4\pi(x^2 + z^2)^{7/2}}. \quad (4)$$

В обоих случаях учитывалось, что база градиометра параллельна оси x , а плоскость градиометра лежит в горизонтальной плоскости x,y на высоте z .

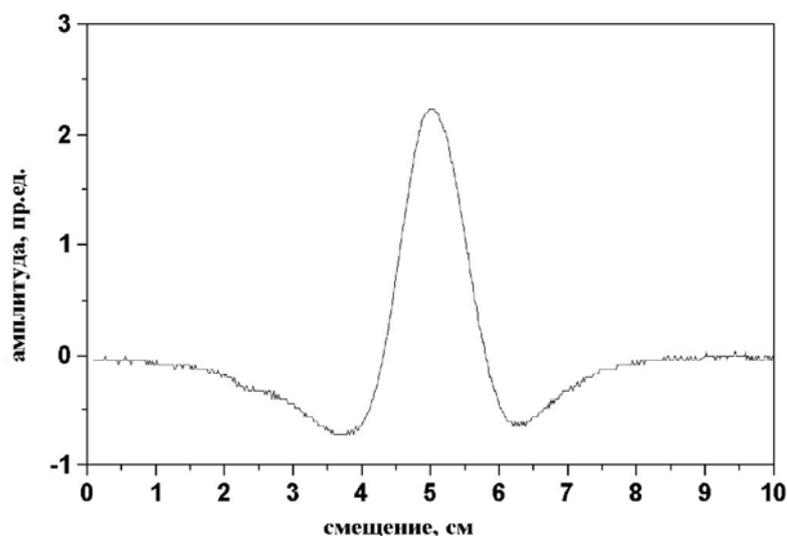


Рис.2. Пример измерения ВТСП СКВИД градиометром сигнала магнитной частицы с магнитным моментом ориентированном параллельно оси x .

В случае сферической формы частицы из SmCo_5 ее удельный магнитный момент составляет величину $\sim 0.07 \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{г}$. Частица диаметром ~ 10 микрометров имеет массу $\sim 7 \text{ нг}$ и, соответственно, магнитный момент $P \sim 0.5 \text{ нА}\cdot\text{м}^2$. Максимальное магнитное поле такой частицы на расстоянии $\sim 15 \text{ мм}$ составляет $\sim 30 \text{ пТл}$. Градиент магнитного поля $\partial B_z/\partial x [\text{Тл/м}]$ на данном расстоянии от частицы составляет $\sim 0.64\mu_0 P/\pi z^4 \sim 25 \text{ пТл/см}$. С учетом частотного диапазона ($\sim 100 \text{ Гц}$), приемлемого отношения сигнал/шум ~ 10 и измеренной спектральной плотности шумов получаем, что для рутинных измерений минимальный детектируемый градиент магнитного поля составляет $\sim 30 \text{ пТл/см}$. Таким образом, согласно данным оценкам, минимальный размер наблюдаемых частиц составляет $\sim 10 \text{ мкм}$, что хорошо соответствует результатам наблюдений. В случае стальных частиц их удельный магнитный момент в ~ 10 раз меньше удельного магнитного момента SmCo_5 . Соответственно, минимальный размер детектируемых частиц из стали составляет $\sim 20 \text{ микрон}$.

Описанная выше измерительная система обеспечивала необходимое разрешение при быстрых проверках конструкционных материалов и была проста в обращении при работе в магнитно-неэкранированных условиях лаборатории. В перспективе, увеличение базовой длины градиометра

и проведение сканирований по плоскости позволит лучше характеризовать свойства магнитных частиц.

2. ВТСП СКВИД системы для магнитной микроскопии

Одним из первых применений СКВИДов практически сразу после их изобретения было изучение распределения квантов магнитного потока в ниобиевой проволоке диаметром ~ 50 мкм [18]. Использование СКВИДов в данном случае обусловлено уникальной комбинацией их чувствительности, пространственного разрешения и практически отсутствием обратного воздействия на объект исследования. Возможность представления двумерного распределения определенной компоненты магнитного поля с пространственным разрешением лучше 100 мкм позволяет говорить о соответствующем устройстве имеющем СКВИД в качестве чувствительного элемента как о СКВИД микроскопе. Отличительной чертой СКВИД микроскопа является возможность количественного измерения слабого магнитного поля с разрешением по магнитному моменту малых объектов до значений $\sim 10^{-15}$ А·м²/√Гц [19] и его пространственного распределения. Интересными применениями СКВИД микроскопа являются, в частности, изучение d-симметрии волновой функции в ВТСП [20, 21], магнитных пленок [22, 23] и других фундаментальных исследований [24].

В современном СКВИД-микроскопе образец перемещается вблизи СКВИДа в то время как компьютер записывает сигнал СКВИДа в зависимости от всех трех координат (x,y,z) образца. Так как магнитное поле микрообъектов быстро падает с расстоянием, то основная проблема ограничивающая чувствительность и пространственное разрешение СКВИД микроскопа состоит в уменьшении расстояния между объектом и СКВИДом. В большинстве случаев пространственное разрешение ограничивается размерами приемной петли СКВИДа и/или расстоянием от нее до исследуемого объекта. Наименьшее расстояние может быть достигнуто в случае, когда СКВИД и объект находятся в общем объеме – в криогенной жидкости или вакууме. Однако, это затрудняет использование данных СКВИД микроскопов: в дополнение к ограничениям на выбор объекта исследования, имеются трудности с позиционированием образца относительно СКВИДа и при перезагрузке образцов.

С развитием ВТСП стала возможной работа СКВИДов при азотных температурах, что расширило круг исследований и стимулировало коммерческие применения СКВИД микроскопов [25]. Открылась возможность использования более простых, охлаждаемых жидким азотом или криокулером криостатов, имеющих меньшее расстояние между находящимся в вакуумном объёме СКВИДом и внешней поверхностью криостата. Таким образом облегчилось изучение объектов,

находящихся в воздухе при комнатной температуре. Данное обстоятельство особенно важно, например, при биомагнитных исследованиях, а также при изучении локального распределения магнитной восприимчивости в геологических образцах или конструкционных материалах, закороток и токов утечки в интегральных схемах, однородности намагниченности пленок магнитных структур в спинтронике и так далее. Для дальнейшего улучшения чувствительности и пространственного разрешения СКВИД микроскопа между СКВИДом и исследуемым объектом используются проводники магнитного потока из пермаллоевой проволоки [26 - 30] или пермаллоевой фольги [31].

В данном разделе описано применение ВТСП СКВИДов для магнитной микроскопии объектов, находящихся вне криостата при комнатной температуре с помощью СКВИД микроскопов двух типов: (2.1) сканирующего СКВИД микроскопа (ССМ) с регистрацией магнитного поля автономным СКВИДом и (2.2) сканирующего СКВИД микроскопа с проводником магнитного потока (ССМ с ПМП) из аморфной пермаллоевой фольги. В первом случае основной проблемой является обеспечение наименьшего расстояния между объектом и СКВИДом, тогда как во втором случае основная задача состояла в обеспечении наилучшей связи по магнитному потоку между проводником магнитного потока и СКВИДом.

2.1. Сканирующий СКВИД микроскоп.

При разработке сканирующего СКВИД микроскопа (ССМ) основной проблемой является обеспечение минимального расстояния между находящимся вне криостата при комнатной температуре измеряемым объектом и СКВИДом. Охлаждаемый хладопроводом СКВИД помещается в вакууме рядом с тонким окном во внешней стенке криостата. Из соображений механической стабильности и минимизации прогиба окна уменьшение его толщины желательно проводить при одновременном уменьшении его диаметра. Соответственно, для того, чтобы максимально приблизить СКВИД к окну необходимо было также существенно уменьшить размер СКВИДа и его подложки. Механическая юстировка СКВИДа относительно окна практически ограничена на размерах ~ 100 мкм. На данном масштабе использование трансформаторов потока оказывается неэффективно и это определило выбор автономного СКВИДа для ССМ [32]. В качестве джозефсоновских переходов были выбраны бикристаллические переходы как наиболее простые в изготовлении и имеющие большее характерное напряжение.

В случае автономного СКВИДа с круглой петлей его эффективная площадь в первом приближении совпадает с геометрической площадью, что оптимально с точки зрения чувствительности и пространственного разрешения. Внутренний диаметр петли СКВИДа был

~ 50 мкм, а внешний диаметр петли СКВИДа составлял ~ 70 мкм. Увеличение внешнего диаметра петли СКВИДа позволяет пропорционально улучшить поле-потоктовую чувствительность СКВИДа, однако ухудшает пространственное разрешение и уменьшает динамический диапазон СКВИДа в магнитных полях.

ВТСП ПТ-СКВИД для ССМ были разработаны и изготовлены в Исследовательском центре Юлих (Германия). СКВИДы были изготовлены на бикристаллической подложке SrTiO_3 (100) с симметричной разориентировкой $2 \times 12^\circ = 24^\circ$ в плоскости подложки. Ширина бикристаллических джозефсоновских переходов составляла ~ 1 мкм, критический ток (10-30) мкА, а характерное напряжение $I_c R_n$ до 400 мкВ при 77.4 К. Коэффициент преобразования поле-поток данного СКВИДа составлял ~ 500 нТл/ Φ_0 , а амплитуда модуляции вольт-потоктовой характеристики составляла ~ 30 мкВ. СКВИД пассивировался пленками SiO и электронного фоторезиста для защиты во время механической обработки.

После разделения подложки один из СКВИДов был приклеен двухкомпонентным клеем на торце сапфирового теплопровода и сошлифован с четырех сторон до размеров 0.5 мм x 0.7 мм. Контактные площадки токовводов СКВИДа были вынесены на боковую поверхность сапфирового хладопровода серебряными пленками толщиной ~ 200 нм. На рис.3а приведена фотография данного СКВИДа с тонкопленочными токовводами, расположенного на острие сапфирового хладопровода. Катушка обратной связи и нагреватель наклеивались на сапфировый хладопровод на расстоянии ~ 1 мм от СКВИДа.

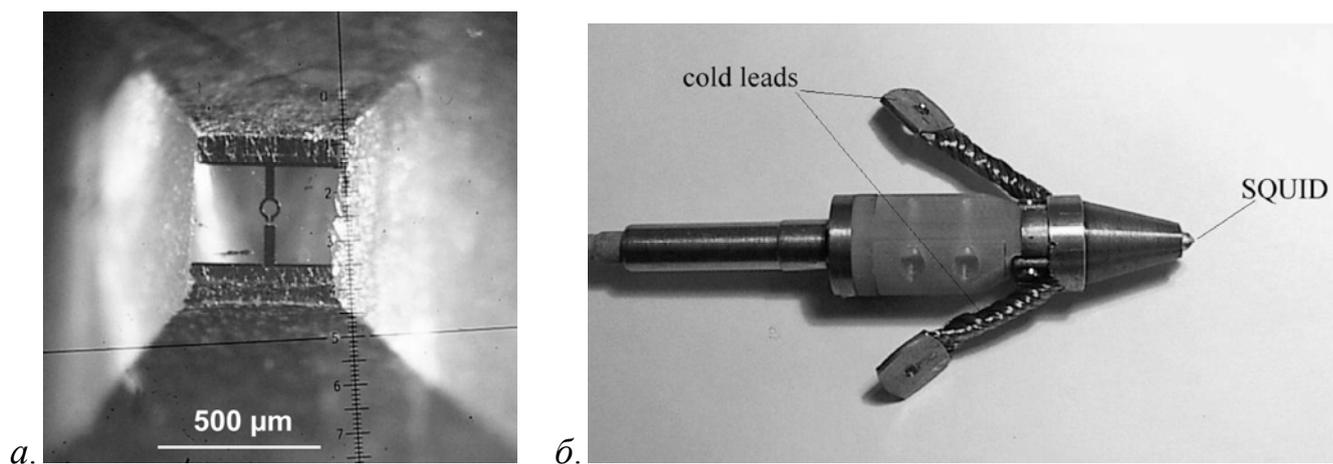


Рис. 3. (а) Фотография автономного СКВИДа с диаметром петли ~ 50 мкм и (б) его расположение на острие сапфирового хладопровода в сенсоре ССМ в сборе с присоединенным криокабелем.

Сапфировый хладопровод с расположенным на нем СКВИДом был вклеен в медный держатель, имеющий распилы вдоль оси для уменьшения в нем токов Фуко и тепловых магнитных шумов. На медном держателе крепились окружающий сапфировый хладопровод радиационный экран, и гибкие хладопроводы из жгутов медных проволок. В свою очередь, медный держатель наклеивался на стеклопластиковый корпус, содержащий электрическую схему согласования импеданса и 10-ти штырьковый разъем LEMO. Весь ВТСП ПТ-СКВИД сенсор для ССМ в сборе и с присоединенным криокабелем представлен на рис.3б. Долговременная химическая стабильность СКВИДа обеспечивалась его хранением в вакууме вакуумной рубашки криостата. Гибкие медные хладопроводы обеспечивали тепловой контакт и охлаждение сенсора от резервуара с жидким азотом. Уступ на медном радиационном экране служил пьедесталом для стеклопластикового крепления, помогающего автоматически поддерживать микронное расстояние между СКВИДом и окном.

На рисунке 4 представлена спектральная плотность СКВИД сенсора ССМ, измеренная в магнитном экране (сплошная кривая) и вне магнитного экрана (пунктирная линия). В обоих случаях было получено разрешение по магнитному полю ~ 8 пТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в области белого шума на частотах более 100 Гц. На частотах ниже 70 Гц шумы неэкранированного СКВИДа представляли собой типичный шум магнитного поля в лаборатории, что подтверждалось измерениями с другими датчиками магнитного поля, в том числе и более чувствительными СКВИДами. Чувствительность сенсора на частоте ~ 1 Гц составляла ~ 20 пТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

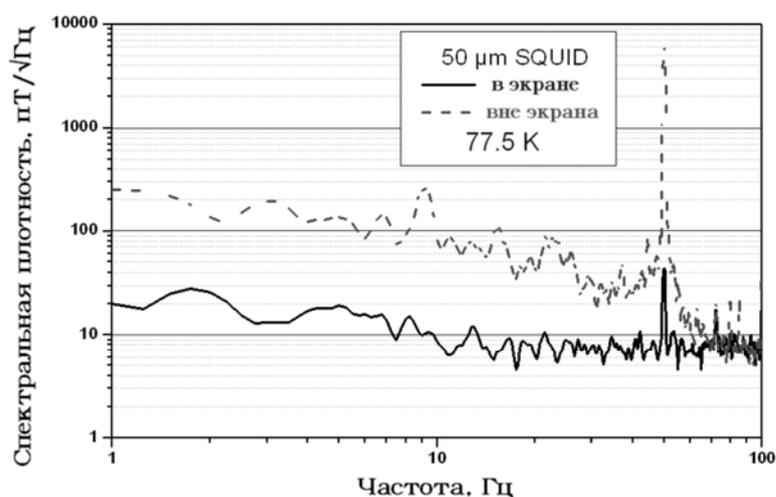


Рис. 4. Спектральные плотности шумов СКВИД сенсора ССМ, измеренные в магнитном экране (сплошная кривая) и вне магнитного экрана (пунктирная линия).



Рис. 5. Фотография ССМ фирмы Tristan Technologies inc., содержащего в качестве чувствительного элемента разработанный и изготовленный в Юлихе ВТСП СКВИД.

Данный СКВИД был установлен в ССМ при помощи устройства автоматической поддержки микронного расстояния между СКВИДом и окном, разработанного фирмой «Tristan Technologies inc.» (патент US2003042898). Данное расстояние устанавливалось единожды на фирме и не требовало дальнейшей юстировки пользователем. Дополнительным преимуществом данной конструкции является безопасность для СКВИДа и окна даже в случае непредвиденного отогрева дьюара, сопровождаемого термическим расширением холодных частей криостата.

На рисунке 5 представлена фотография ССМ фирмы «Tristan Technologies inc.», содержащего описанный выше ВТСП ПТ-СКВИД в качестве чувствительного элемента. Характерными особенностями данного микроскопа являются термическая изоляция сенсора и дьюара, а также расположение сканирующей платформы на вибрационно-изолированном столе. На дополнительном столе располагались СКВИД электроника, мониторы и компьютер. С помощью лазерного профилометра, видеотелескопа высокого разрешения и сканирующей платформы достигалась микронная точность позиционирования образца под сенсором.

Вибрационно-изолирующий стол ССМ содержал систему активного демфирования, компенсирующую с помощью соответствующей обратной связи большую часть внешних вибраций и шумов шаговых двигателей. Тем не менее, несмотря на данные предосторожности движение моторов приводило к дополнительному увеличению шумов сенсора в ~ 10 раз на частоте 1 Гц.

Расстояние между СКВИДом и окном калибровалось в откаченном и охлажденном состоянии при помощи метода магнитной петли. Через две расположенные на определенном расстоянии параллельные проволоки пропускался определенный ток в противоположных направлениях. При помощи подгонки теоретических оценок к экспериментальной кривой было получено, что минимальное расстояние между СКВИДом и находящимся вне криостата образцом составляло ~ 400 мкм.

Эффективную чувствительность системы можно характеризовать по минимальному детектируемому изменению поля, которое может быть зарегистрировано в присутствии окружающего шума. При минимальном расстоянии была получена амплитуда сигнала ~ 120 мкВ от переменного тока частотой 200 Гц и амплитудой ~ 600 нА, протекающего через описанную выше пару параллельных проводов. В стандартных неэкранированных лабораторных условиях уровень шума составлял ~ 7.5 мкВ. С учетом использованного времени усреднения $\tau \sim 1$ сек получаем величину наименьшего детектируемого тока ~ 75 нА, что соответствует разрешению системы по магнитному полю ~ 25 пТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Измерения в экранированных условиях позволили бы детектировать более слабые поля в соответствии с приведенным на рис. 4 спектром.

На рисунке 6 представлен профиль магнитного поля, полученный в результате сканирования расположенного в непосредственной близости к СКВИДу ряда параллельных проводов с током ~ 600 нА с целью определения чувствительности и пространственного разрешения ССМ.

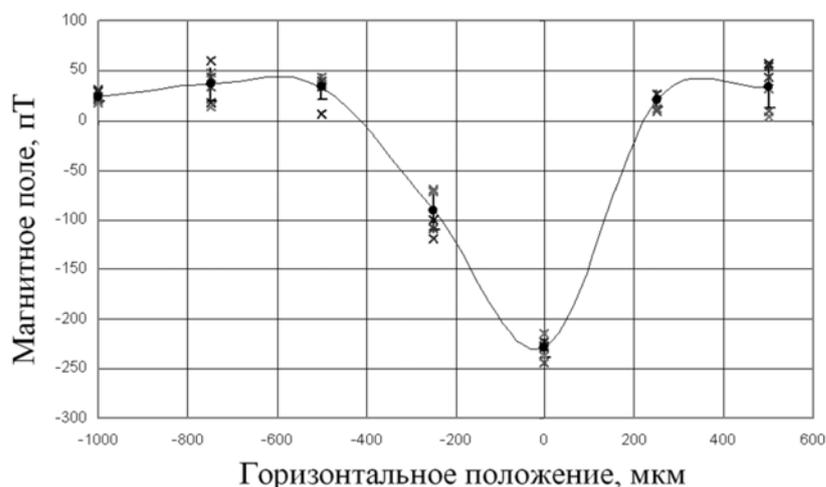


Рис. 6. Профиль магнитного поля, полученный в результате сканирования ряда параллельных проводов с током с целью определения чувствительности и пространственного разрешения ССМ.

Пространственное разрешение системы оценивалось из чувствительности СКВИДа и полученного в результате данного измерения максимального градиента магнитного поля $\partial B_z/\partial x$. В лабораторных условиях при постоянной времени $\tau \sim 1$ сек. разрешение по магнитному полю составляло $\delta B \sim 25$ пТ. На основании полученных данных было получено пространственное разрешение $\delta x = \delta B/(\partial B_z/\partial x) \sim 25$ мкм. Это значение было улучшено до ~ 10 мкм при пропускании через проволоки бóльшего тока.

Данный ССМ может быть также использован для изучения распределения статического магнитного поля других объектов, таких как, например, шлифов геологических проб, мягкомагнитных пленок или магнитных лент. Наблюдаемое при этом пространственное разрешение аналогично полученному на проводах с током разрешению.

В данном ССМ имеется также возможность проводить бесконтактное картографирование распределения проводимости методом вихревых токов и измерения магнитной восприимчивости. С данной целью на дне криостата устанавливались катушка или кольцевой постоянный магнит, создающие однородное магнитное поле величиной до ~ 10 гаусс в месте расположения сенсора и образца. После сканирования образца в присутствии магнитного поля проводилось вычитание из данных результатов сканирования без магнитного поля. Полученная разностная карта отображала локальное распределение статической восприимчивости образца.

Таким образом, благодаря использованному ПТ-СКВИДу с субмикронными джозефсоновскими переходами и конструкции криостата описанный выше ССМ позволил проведение картографирования локальной магнитной восприимчивости. Это выгодно отличало данный ССМ от ССМ с ферромагнитной антенной, так как обычно используемый в качестве материала ферромагнитной антенны пермаллой насыщается в полях ~ 100 мТл.

2.2. СКВИД микроскоп с проводником магнитного потока.

Пространственное разрешение ССМ в основном ограничено расстоянием между СКВИДом и находящимся вне криостата образцом. Эффективным методом улучшения пространственного разрешения является ССМ с проводником магнитного потока (ПМП) из ферромагнитного материала [26]. В подавляющем большинстве случаев в качестве ПМП использовался отрезок пермаллоевой проволоки диаметром ~ 0.1 мм, заостренный с помощью химического травления со стороны образца до диаметра ~ 0.1 мкм. Противоположный торец проволоки упирался в петлю СКВИДа. Таким образом было получено разрешение ~ 0.3 мкм при сканировании содержащего ферромагнитные микрочастицы холодного образца [28]. Существенными недостатками данной

конструкции являются относительно большие потери в чувствительности из-за отсутствия проводника магнитного потока через петлю СКВИДа и обратно к образцу, а также плохое пространственное разрешение при исследовании магнитных полей токов. Магнитное поле тока, протекающего по тонкому проводнику убывает с расстоянием r по относительно слабому закону $\sim 1/r$, при котором ферромагнитная антенна улавливает большую часть магнитного потока по всей своей длине, и только небольшая его часть детектируется на острие [33]. Соответственно, пространственное разрешение микроскопа для данного объекта опять же определяется расстоянием от объекта до СКВИДа. Магнитное поле ферромагнитных микрочастиц убывает с расстоянием по достаточно быстрому закону $\sim 1/r^3$, при котором детектируется главным образом вблизи острия ферромагнитной антенны.

Повышение чувствительности и пространственного разрешения ССМ с ПМП было выполнено [31] замыканием ПМП по всему пути от образца через СКВИД и обратно к образцу. С данной целью был разработан магнитометр с автономной связью, имеющий приемную петлю размером ~ 3 мм х 1.5 мм. С помощью ультразвукового дробления внутри приемной петли насквозь через подложку было изготовлено отверстие размером ~ 0.1 мм х 1 мм, достаточное для пропускания через него магнитной антенны из заосренной полоски фольги аморфного сплава $(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Mo})_{73}(\text{Si}, \text{B})_{27}$ (Vitrovac 6025F фирмы «Vacuumschmelze GmbH», Германия) шириной ~ 1 мм и толщиной ~ 25 мкм (рис.7). Магнитная антенна проходила от исследуемого объекта через данное отверстие и возвращалась обратно к объекту, что позволило минимизировать потери магнитного потока и улучшить пространственное разрешение в случае медленно спадающих магнитных полей.

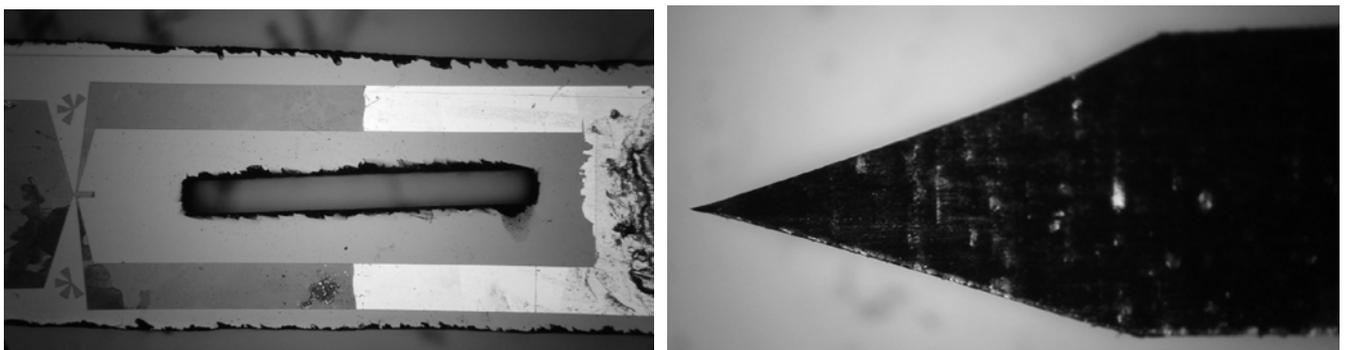


Рис. 7. Фотография магнитометра с автономной связью, имеющего приемную петлю размером ~ 3 х 1.5 мм² и отверстие в подложке размером ~ 0.1 мм х 1 мм в центре приемной петли. Справа приведена фотография острия полоски аморфного пермаллоя шириной ~ 1 мм и толщиной ~ 25 мкм, пропускаемой сквозь отверстие в приемной петле СКВИДа и служащей в качестве ПМП.

Выбор фольги из аморфного пермаллоя для ПМП обосновывался высоким значением магнитной восприимчивости ($\mu_r \sim 10^5$), малым гистерезисом (коэрцитивное поле меньше 10 мкТл) и достаточно малыми шумами. Направление среза фольги было перпендикулярно направлению ее максимальной магнитной восприимчивости, что обеспечивало линейное намагничивание вдоль ПМП при монотонном изменении ориентации доменов [34] и минимизировало таким образом шумы Баркгаузена ферромагнитного ПМП.

Было проведено сравнение между ПМП из используемой другими группами ферромагнитной проволоки диаметром ~ 100 мкм и данной пермаллоевой фольгой. Получено, что пермаллоевая фольга проводит на ~ 2 порядка бóльший магнитный поток по сравнению с использованной в работе [28] ферромагнитной проволокой из того же материала, что соответствует отношению произведений их поперечного сечения и магнитной восприимчивости.

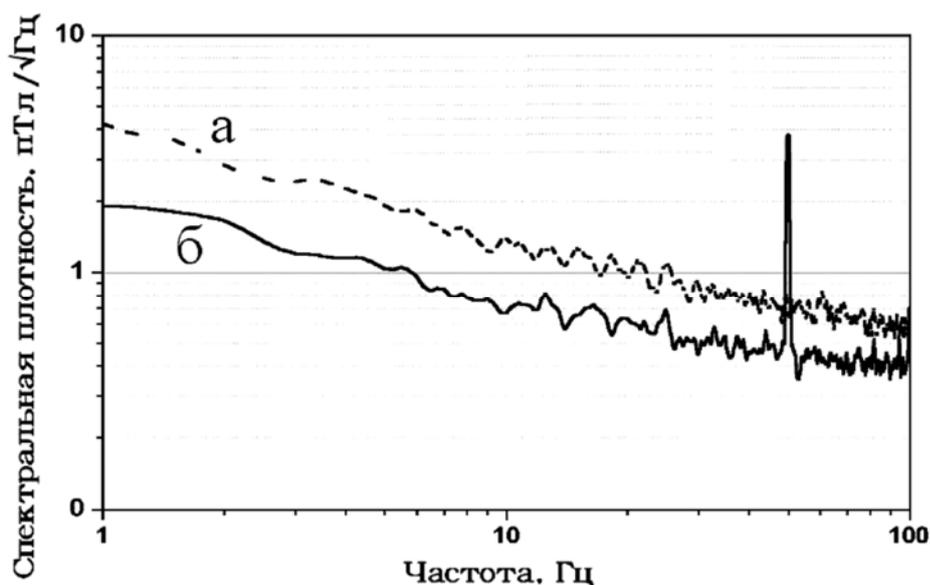


Рис. 8. Спектральная плотность собственных шумов используемого для ССМ с ПМП магнитометра, измеренная в магнитном экране вместе с ПМП (а) и без ПМП (б).

На рис. 8 приведены спектральные плотности собственных шумов используемого для ССМ с ПМП представленного на рис. 7 магнитометра, измеренная в магнитном экране вместе с ПМП и без ПМП. Кривые приведены с учетом изменения коэффициента преобразования поле-поток при введении ПМП. Видно, что наличие ПМП достаточно мало меняет шумы измерительной системы.

Уровень термически возбужденных магнитных шумов в нулевом поле можно оценить согласно полученному теоретически в работе [35] уравнению:

$$\langle \mathbf{H}_N^2 \rangle^{1/2} \approx \sqrt{\frac{4k_B T}{V\mu}} \approx 10 \text{ фТ} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (4)$$

где V - объём ПМП, а μ - коэффициент магнитной восприимчивости ПМП на нулевой частоте. Полученная величина на порядки меньше наблюдаемых экспериментально магнитных шумов, что свидетельствует о наличии более существенного источника шумов в ПМП. Наиболее вероятным из таких источников магнитных шумов может быть релаксация неоднородной остаточной намагниченности ПМП.

СКВИД с ПМП был расположен на торце сапфирового теплопровода в вакуумном зазоре азотного криостата. Расстояние между СКВИДом и сапфировым окном составляло ~ 2 мм. Изготовленный из пермаллоевой фольги ПМП проходил через сапфировое окно и был в него вакуумно-плотно вклеен с помощью эпоксидного клея. Расстояние между СКВИДом и острием ПМП составляло ~ 3 мм. Рабочая температура СКВИДа составляла ~ 78 К.

ПМП и СКВИД были дополнительно заэкранированы дополнительной пермаллоевой фольгой «Vitrovas» со всех сторон за исключением небольшого круглого отверстия диаметром ~ 70 мкм в центре которого располагался заостренный конец ПМП. В данной конфигурации только магнитный поток из области острия передается к СКВИДу. Нижняя часть криостата, содержащая СКВИД и ПМП окружалась дополнительным пермалловым экраном, который уменьшал в ~ 50 раз влияние внешних магнитных полей, возникающих от движения сканирующего стола, вибраций в поле Земли и интерференции сетевой частоты 50 Гц. Это также гарантировало, что ПМП работал вблизи нулевого поля на линейном участке кривой намагничивания вдали от насыщения и не проявлял гистерезисных эффектов.

Благодаря высокому удельному сопротивлению и малой толщине фольги аморфного пермаллоя из которого был изготовлен ПМП эффект вихревых токов на частотах ниже ~ 10 кГц был пренебрежимо мал. Низкая теплопроводность данной фольги ограничивала теплоподвод по ней к СКВИДу. Общая оптимизация теплозащиты 0.8-литрового криостата фирмы «ILK» (Германия) позволяла проводить измерения в течение двух дней без долива жидкого азота.

Образец передвигался сканирующей платформой по всем трем координатам x , y и z с точностью позиционирования лучше ~ 1 мкм при площади сканирования в плоскости xy более 15 см x 15 см. Фотография ССМ с ПМП и прецизионной сканирующей платформой приведена на рис.9. В представленном на рис.9 случае использовался более компактный криостат фирмы ILK (Германия) вместимостью ~ 200 мл жидкого азота, имеющем ресурс работы ~ 4 часа.

Почти постоянное расстояние в несколько микрометров между поверхностью образца и острием ПМП достигалось немагнитным столиком, имеющим механическую подстройку уровня и двух оптических телескопов. Сервомоторы сканирующей платформы располагались на расстоянии более 40 см от острия ПМП и имели дополнительную магнитную экранировку. Диапазон сканирования и его скорость, а также сбор данных и их представление в графическом виде осуществлялись при помощи персонального компьютера.

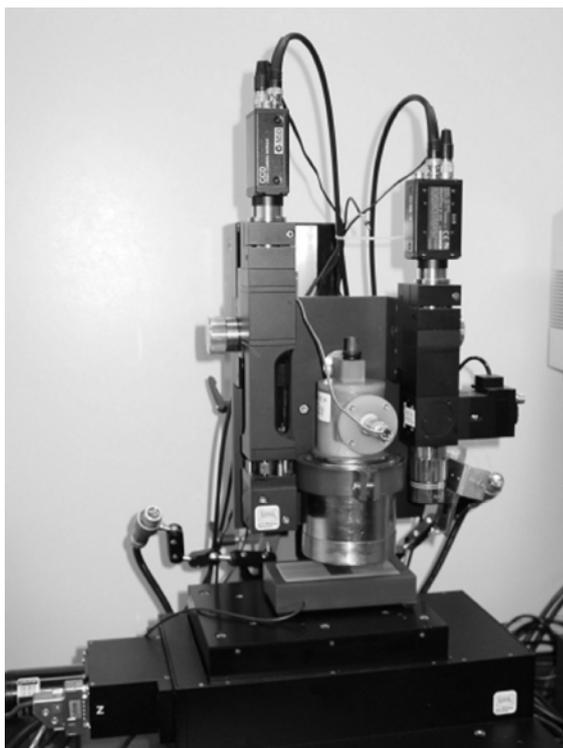


Рис. 9. Фотография СТМ с ПМП и немагнитной прецизионной сканирующей платформой.

Работа СКВИДа обеспечивалась СКВИД электроникой производства НПО «КРИОТОН», работающей с переменным током смещения в режиме замкнутой обратной связи. Сигнал СКВИДа модуляция по потоку при помощи маленькой катушки из медной проволоки, намотанной на ферромагнитную проволоку диаметром ~ 25 мкм, которая также проходила через отверстие в приемной катушке СКВИДа. Выходной сигнал СКВИД электроники в режиме замкнутой обратной связи был пропорционален магнитному потоку, передаваемому посредством ПМП от его острия через приемную катушку СКВИДа.

Выходной сигнал СКВИД электроники дополнительно отфильтровывался при помощи синхронного фильтра производства НПО «КРИОТОН». Данный фильтр удалял практически полностью интерференцию сигнала сетевой частоты 50 Гц и ее гармоник, что было особенно

важным при детектировании статических магнитных полей образцов. При изучении магнитных полей токов использовалась модуляция токов и техника синхронного детектирования на частоте ~ 1 кГц, на которой собственные шумы СКВИДа, внешние магнитные шумы и механические вибрации были минимальны.

Тестовые тонкопленочные образцы, содержащие петли и меандры различного размера были изготовлены при помощи литографии платиновых пленок толщиной ~ 100 нм, осажденных методом магнетронного распыления. Также исследовались распределение магнитного поля над поверхностью различных магнитных носителей информации многократного использования, таких как, например, дискеты для персонального компьютера или различные ферромагнитные пленки, содержащие слои железа или кобальта толщиной в несколько нанометров. Подобные магнитные пленки используются для магнитоэлектронных приборов, в частности, в спинтронике.

Пространственное разрешение и чувствительность ССМ с ПМП проверялись измерениями магнитных полей тонкопленочных структур, несущих заданный ток. В левой части рис. 10 представлен результат измерения магнитного поля петли с током, имеющей внутренний диаметр ~ 80 мкм и ширину полоски проводника ~ 10 мкм. В правой части рисунка представлена фотография данной петли. Величина магнитного поля представлена в данном случае оттенками серого цвета. Максимальная величина магнитного поля в центре петли составляла ~ 1 мкТл при величине пропускаемого через петлю переменного тока ~ 74 мкА имеющего частоту ~ 1.6 кГц. Постоянная интегрирования синхродетектора составляла ~ 10 мсек.

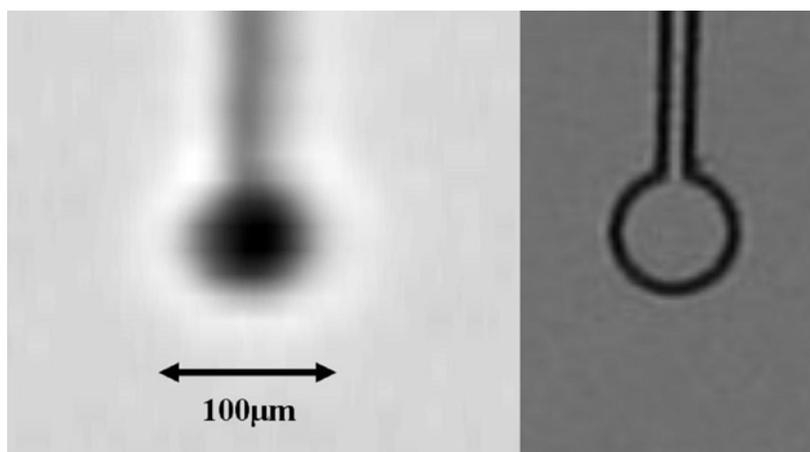


Рис. 10. Результат измерения магнитного поля петли с током, имеющей внутренний диаметр ~ 80 мкм и ширину полоски проводника ~ 10 мкм. Величина магнитного поля представлена в данном случае оттенками серого цвета. В правой части рисунка представлена фотография данной петли.

Представленная в левой части рис.10 область сканирования составляла $400 \times 400 \text{ мкм}^2$ и складывалась из 100 линий сканирования по 1300 точкам измерения на каждой из линий. При скорости сканирования $\sim 0.5 \text{ мм/сек}$ время измерения данного изображения составляло ~ 2 минут.

На рис. 11 представлен результат линейного сканирования магнитного поля через центр тонкопленочной петли, имеющей внутренний диаметр $\sim 80 \text{ мкм}$ и ширину полоски проводника $\sim 10 \text{ мкм}$ по которой протекал переменный ток величиной в $\sim 7.4 \text{ мкА}$. При данном токе расчетная амплитуда магнитного поля в центре петли составляла $\sim 0.1 \text{ мкТл}$, что с учетом использованной полосы измерений $\sim 100 \text{ Гц}$ и наблюдаемого отношения сигнала/шум приводит к оценке чувствительности данного ССМ с ПМП на уровне $\sim 0.6 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$. При увеличении отверстия в экране вокруг острия ПМП чувствительность ССМ улучшается до значений собственных шумов СКВИДа со вставленным ПМП, так как ПМП собирает магнитный поток с бóльшей эффективной площади. По этой же причине увеличение отверстия в экране приводит к ухудшению пространственного разрешения ССМ.

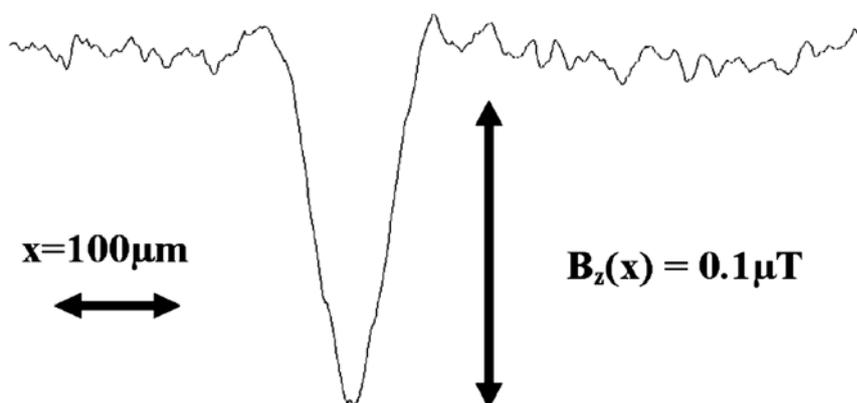


Рис. 11. Результат измерения магнитного поля тонкопленочной петли, имеющей внутренний диаметр $\sim 80 \text{ мкм}$ и ширину полоски проводника $\sim 10 \text{ мкм}$ по которой протекал ток в $\sim 7.4 \text{ мкА}$. Постоянная времени синхродетектора составляла $\sim 10 \text{ мсек}$.

Пространственное разрешение характеризовалось двумя методами: визуальным и расчетным. В качестве тестового объекта использовался тонкопленочный меандр, по которому пропускался переменный ток в $\sim 90 \text{ мкА}$ частотой $\sim 1.6 \text{ кГц}$. Токи соседних полосок создавали магнитные поля противоположного направления. В левой части рис.12 приведено измеренное распределение магнитного поля $B_z(x,y)$ над меандром, имеющем расстояние между полосками тока $\sim 10 \text{ мкм}$.

Сразу бросается в глаза короткое замыкание тока в левой части меандра. Данное замыкание было обнаружено на маске для литографии уже после инспекции магнитных полей структуры, так как в оптическом микроскопе оно значительно менее различимо.

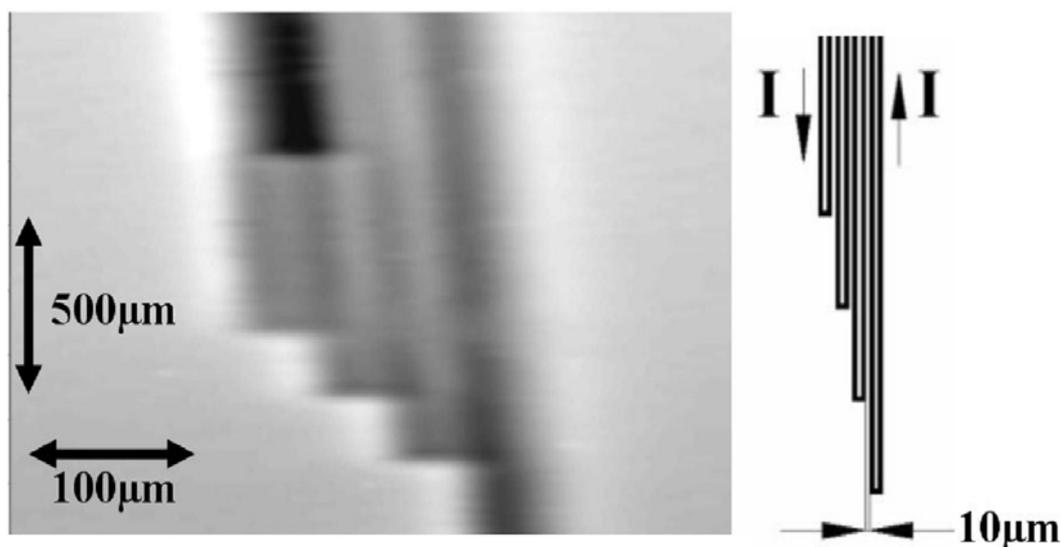


Рис. 12. В левой части рисунка приведено измеренное распределение магнитного поля $B_z(x,y)$ над меандром, имеющем расстояние между полосками тока ~ 10 мкм. Область сканирования составляла 400 мкм \times 1600 мкм.

Визуально, по распределению магнитного поля в различных участках меандра на рис.12 можно распознать отдельные пути и направления токов, что демонстрирует улучшение пространственного разрешения в ~ 5 раз по сравнению с типичным визуальным пространственным разрешением, достигнутым для ССМ без ПМП при изучении находящихся вне криостата объектов.

Метод математической реконструкции протекающих по поверхности токов $j(x,y)$ по результатам измерений распределения нормальной компоненты магнитного поля $B_z(x,y)$ способен более чем в ~ 20 раз улучшить пространственное разрешение ССМ [36]. Следовательно, в случае применения адаптированного для ССМ с ПМП метод математической реконструкции можно ожидать улучшение пространственного разрешения до значений ~ 0.5 мкм.

Аналогичные оценки можно сделать применяя описанный в предыдущем подразделе метод. На рис. 13 приведено распределение магнитного поля в направлении поперек токового меандра в бездефектной области. Положение полосок с током указано стрелками, а направление токов отмечено в кружках. Приняв наблюдаемую ширину шумовой дорожки $\delta B = 1$ ед. из рис. 13 получаем максимальный градиент по полю $\partial B/\partial x \sim 63$ ед./20 мкм, что формально соответствует

пространственному разрешению $\delta x \sim \delta B / (\partial B / \partial x) \sim 0.3$ мкм. С более острым наконечником ПМП и меньшим отверстием в пермаллоевом экране возможно дальнейшее увеличение как визуального, так и расчетного пространственного разрешения данного ССМ.

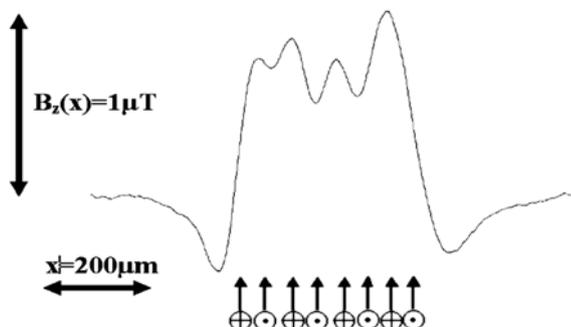


Рис. 13. Распределение магнитного поля в направлении поперек токового меандра в бездефектной области. Положение полосок с током указано стрелками, а направление токов в них отмечено в кружках.

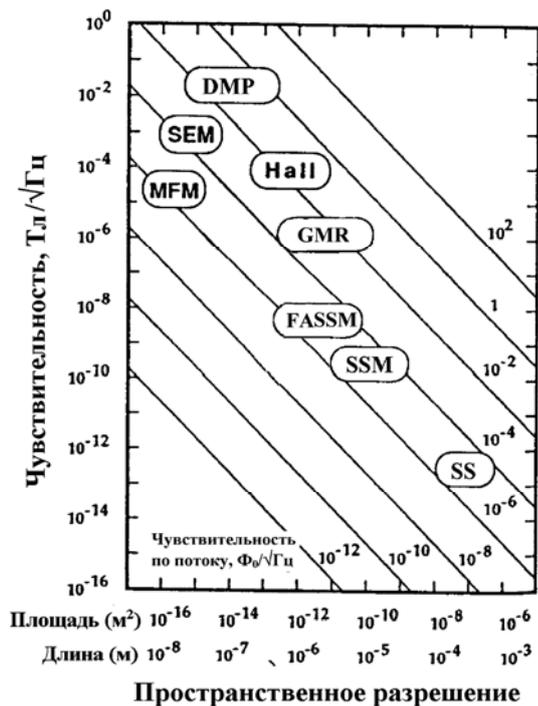


Рис. 14. Сравнение сканирующего ВТСП СКВИД микроскопа с ферромагнитной антенной (FASSM) по чувствительности и пространственному разрешению с приведенными в работе [37] другими методами магнитной микроскопии.

На рисунке 14 приведено сравнение сканирующего ВТСП СКВИД микроскопа с ферромагнитной антенной (FASSM) по чувствительности и пространственному разрешению с

приведенными в работе [37] другими методами магнитной микроскопии по чувствительности и пространственному разрешению различных методов магнитной микроскопии: декорацией магнитными частицами (DMP); сканирующим электронным микроскопом (SEM); GaAs датчиком Холла (Hall); микроскопом магнитных сил (MFM); датчики на гигантском магнеторезистивном эффекте (GMR); сканирующим СКВИДом (SS); сканирующим НТСП СКВИД микроскопом (SSM). Данные по сканирующему СКВИДу приведены для случая НТСП СКВИДа и объекта, находящегося при гелиевой температуре в непосредственном контакте со СКВИДом. В отличие от микроскопа магнитных сил, который имеет гораздо лучшее пространственное разрешение, ССМ с мягкомагнитным ПМП имеет значительно лучшую чувствительность по магнитному полю и не перемагничивает исследуемые магнитные пленки.

3. Биомагнитные измерения

В биомагнитных исследованиях преимущества СКВИД-систем проявляются наиболее полно так как при этом возможен только метод пассивного детектирования с чувствительностью, определяемой собственными шумами датчиков. Для локализации и характеристики источников магнитных полей в биомагнитных исследованиях требуется сочетание предельно возможных полевой чувствительности и пространственного разрешения измерительных систем, возможное только при использовании СКВИДов. Пространственное разрешение СКВИД магнетометров определяется достаточно малым размером приемной петли сверхпроводящего трансформатора потока, что позволяет их использование для большинства биомагнитных исследований.

Магнитокардиография (МКГ) обеспечивает более полную по сравнению с электрокардиографией (ЭКГ) информацию о состоянии сердца человека [38], однако накладывает строгие требования на чувствительность и частотный диапазон измерительной системы. Для получения информации, имеющей медицинскую ценность, частотный диапазон составляет 0.1 – 300 Гц. Хотя исследуемые МКГ-сигналы имеют амплитуду > 1 пТ, чувствительность датчиков необходимо обеспечить на уровне ~ 10 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частотах порядка 10 Гц. Более того, для получения сигнала МКГ, сравнимого по отношению сигнал/шум с сигналом ЭКГ высокого разрешения необходимо иметь чувствительность магнитометра на уровне ~ 5 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Данное разрешение может быть обеспечено с помощью разработанных в Юлихе 16-ти миллиметровых ВТСП ПТ-СКВИД флип-чип магнитометров при рабочей температуре 77 К.

Для магнитоэнцефаллографии (МЭГ) чувствительность измерительной системы по магнитному полю должна быть также лучше 10 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Коммерчески доступные СКВИД

системы на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) имеют типичное разрешение $\sim 5 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при приемной петле $20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}$. Одним из вариантов развития данных систем при условии сохранения их чувствительности является переход на высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние выше температуры кипения жидкого азота 77 К . На ВТСП системах такие параметры уже продемонстрированы.

3.1. Измерительная система для магнитокардиографии

В качестве первой демонстрации использования ВТСП ПТ-СКВИД флип-чип магнетометров в биомагнитных исследованиях была разработана и опробована система измерений для магнитокардиографии (МКГ) [39, 51]. Данная часть работы была выполнена в рамках соглашения о сотрудничестве между Институтом радиотехники и электроники РАН и Институтом Твердотельных Исследований Исследовательского центра Юлих (Германия) о разработках ВТСП СКВИД систем.

Измерения магнитокардиограмм были проведены в магнитно-экранированной комнате (МЭК) клиники "Franz-Volhard" г. Берлин. При закрытой двери в данной МЭК был измерен коэффициент экранирования ~ 10 на частоте менее $0,1 \text{ Гц}$ и более 10000 на частотах выше 50 Гц . В дневное время суток внутри МЭК наблюдался низкочастотный ($\tau \sim 10 \text{ сек}$) дрейф магнитного поля на уровне до $\sim 5 \text{ нТл}$, частично связанный с движением автотранспорта и лифта. Активная система подавления низкочастотных шумов не использовалась. Амплитуда паразитного магнитного сигнала частотой 50 Гц составляла в МЭК менее 10 пТл .

С учетом данной магнитной обстановки в МЭК в качестве чувствительных элементов МКГ системы были выбраны ВТСП ПТ-СКВИД флип-чип магнетометры с приемной катушкой трансформаторов потока размером $16 \text{ мм} \times 16 \text{ мм}$, обеспечивающие разрешение $\sim 6 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}^{1/2}$ при $77,4 \text{ К}$ [39]. На рис.15(а) представлен внешний вид измерительной системы. Двухканальная электроника НПО "КРИОТОН" была использована для одновременной работы пары магнетометров, расположенных в криостате так, как схематично представлено на рис.15(б). Фотография одного из магнетометров представлена на вставке рис.15(б). Вычет сигнала верхнего магнетометра из сигнала нижнего магнетометра приводит к образованию электронного градиометра первого порядка. База градиометра определяется расстоянием между трансформаторами потока магнетометров, расположенных параллельно друг другу на оси стеклопластиковой трубки, и составляла $\sim 10 \text{ см}$. Для охлаждения магнетометров был

использован криостат фирмы "КРИОТОН", вмещающий ~ 1,5 литра жидкого азота. Время полного испарения азота составляло ~ 10 дней при установленной вставке с магнитометрами. Расстояние между холодной и теплой стенками криостата составляло ~ 10 мм, а расстояние от теплой стенки до плоскости трансформатора потока нижнего магнитометра составляло ~ 15 мм.

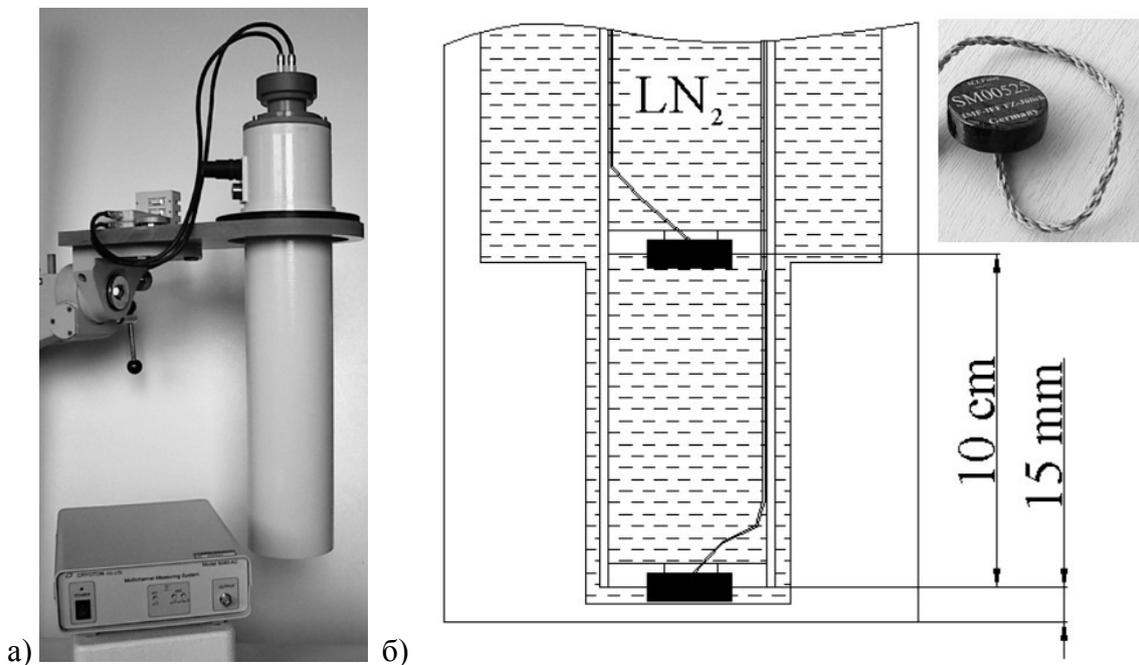


Рис.15. (а) Внешний вид измерительной системы и (б) схема расположения магнитометров внутри криостата.

Спектральные плотности шумов магнитометров и разностного сигнала, измеренные в МЭК представлены на рис.16. Нижняя кривая представляет спектральную плотность шумов одного из магнитометров в сверхпроводящем экране и приведена здесь для сравнения. В сверхпроводящем экране оба магнитометра имеют разрешение лучше ~ 10 фТл/Гц^{1/2} на частотах выше ~ 10 Гц. На частоте 1 Гц собственные шумы магнитометров увеличиваются до ~ 20 фТл/Гц^{1/2}. Наблюдаемый в камере дрейф магнитного поля отражается увеличением спектральной плотности сигнала магнитометров на частотах ниже 10 Гц. Магнитные сигналы в камере в диапазоне частот от 10 Гц до 30 Гц главным образом обусловлены вибрациями здания.

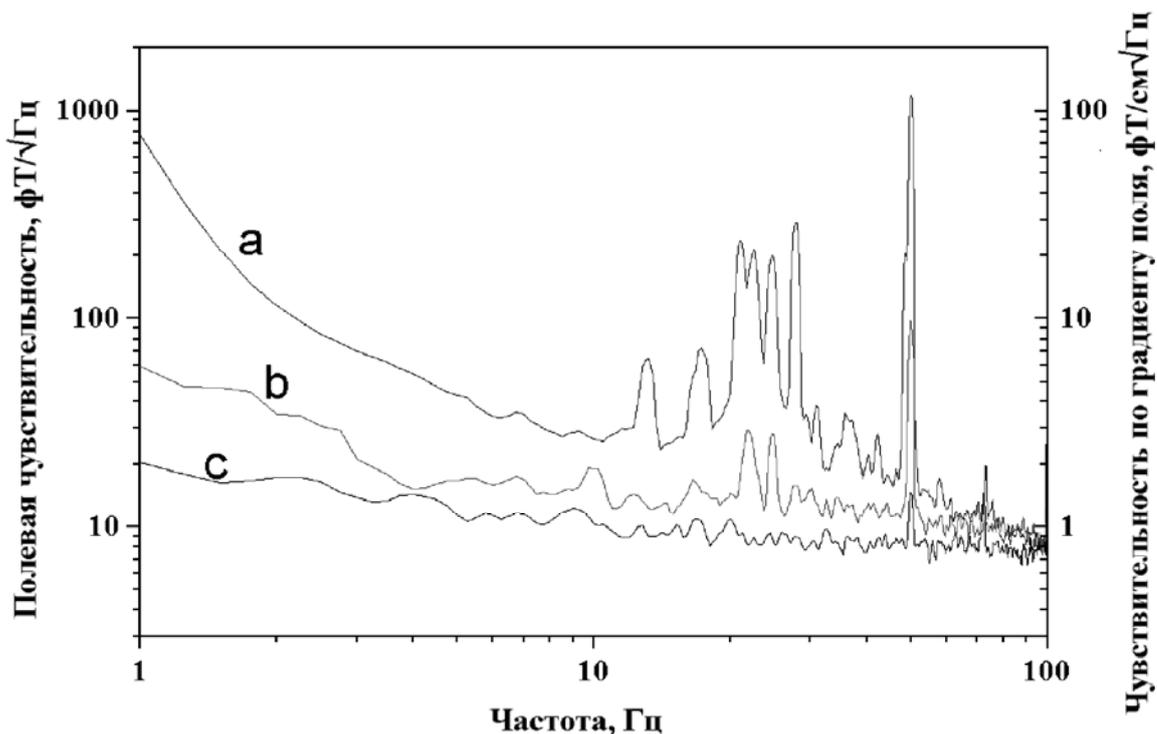


Рис.16. Спектральные плотности сигналов сигнального магнитометра и разностного сигнала, измеренные в магнитно-экранированной комнате (кривые a и b). Нижняя кривая представляет спектральную плотность собственных шумов сигнального магнитометра в сверхпроводящем экране.

Вычитание сигнала референсного магнитометра позволило устранить большую часть низкочастотных шумов, вибрационных эффектов и паразитной 50 Гц интерференции. Спектральная плотность разностного сигнала представлена на рис.16 в единицах [фТл/см√Гц] с учетом базы ~ 10 см электронного градиометра. В результате получено разрешение по градиенту лучше ~ 1 фТл/см√Гц на частотах выше 100 Гц и лучше 2 фТл/см√Гц на частотах выше 4 Гц. Паразитный сигнал интерференции частотой 50 Гц с гармониками во время измерений, представленных на рис.16 не отфильтровывался. Значительного уменьшения низкочастотных (~1 Гц) шумов можно ожидать при использовании системы активного шумоподавления.

Для рутинных клинических применений необходимо обеспечить достаточную чувствительность МКГ системы чтобы обследовать в том числе и пациентов со сравнительно слабым сердцем, имеющим амплитуду магнитного сигнала менее 30 пТл. Поэтому были проведены измерения с помощью ВТСП системы главным образом на пациентах и добровольцах с

максимальной амплитудой магнитного сигнала QRS комплекса ~ 30 пТ. Результаты измерений контролировались с помощью градиометрической НТСП МКГ-системы 2-го порядка.

Сигналы обоих магнитометров измерялись одновременно с записью и обработкой разностного сигнала. Измеренный в данной МЭК магнитометрический сигнал имеет весьма ограниченную медицинскую значимость. Из-за сильного низкочастотного дрейфа магнитного поля в МЭК для регистрации представленного на рис.17 МКГ-сигнала нижнего магнитометра необходимо было использовать фильтр верхних частот с частотой среза ~ 1 Гц, что частично деформировало полезный сигнал. Суммарная амплитуда сигнала интерференции 50 Гц и сигнала, связанного с вибрациями составляет ~ 7 пТл. Эта величина составляет около четверти МКГ-сигнала магнитометра, дополнительно сильно затрудняя интерпретацию неусредненного сигнала. По этой причине только разностный сигнал, полученный в полосе частот 0.03 – 125 Гц, использовался для дальнейших исследований. Неусредненный МКГ-сигнал электронного градиометра представлен на рис.17. Измерения проводились в полосе частот 0.03 – 125 Гц, которая покрывает наиболее значимый для МКГ диапазон частот сигнала сердца.

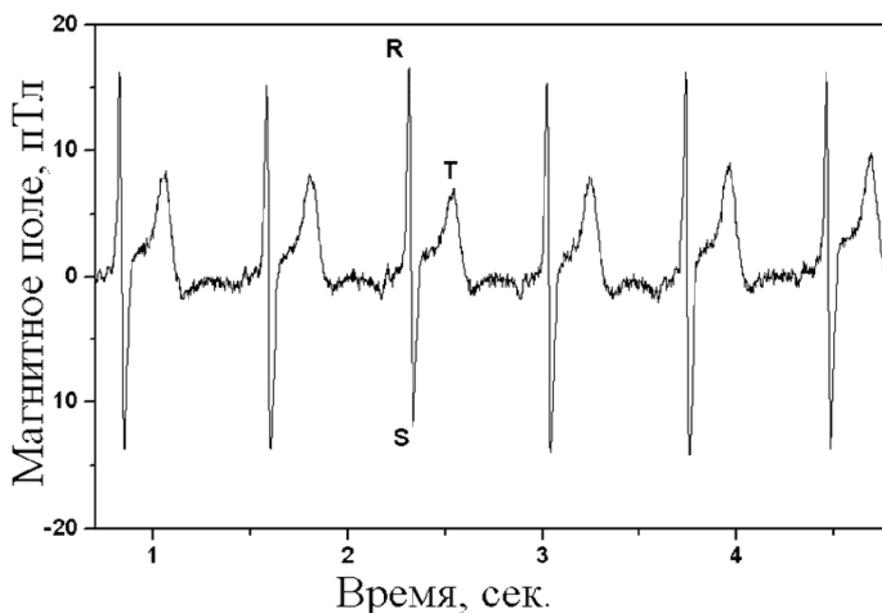


Рис.17. МКГ-сигнал электронного градиометра полученный без усреднений в полосе частот 0.03 – 125 Гц.

Нескомпенсированная часть магнитной наводки 50 Гц со всеми гармониками были подавлены адаптивным синхронным фильтром сетевой частоты. Наблюдаемая ширина шумовой дорожки (рис.17) составляла ~ 500 фТл, что соответствовало эффективному разрешению $S_f^{1/2} \sim 0.7 \cdot 500 / 2\sqrt{\Delta f} \sim 17$ фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в исследованном частотном диапазоне.

Стабильность системы оказалась достаточной для проведения 2D-картографирования МКГ сигнала по стандартной методике (см., например, [40]). Для этого были проведены измерения в 36 узлах прямоугольной сетки 6 x 6 с расстоянием между узлами ~ 4 см в обоих направлениях (рис.18). Площадь сканирования составляет таким образом 20 см x 20 см. В каждой точке проводилось усреднение МКГ-сигнала в течение ~ 30 секунд. R-пики одновременно с МКГ измеряемой электрокардиограммы (ЭКГ) служили триггером при усреднении МКГ сигналов.

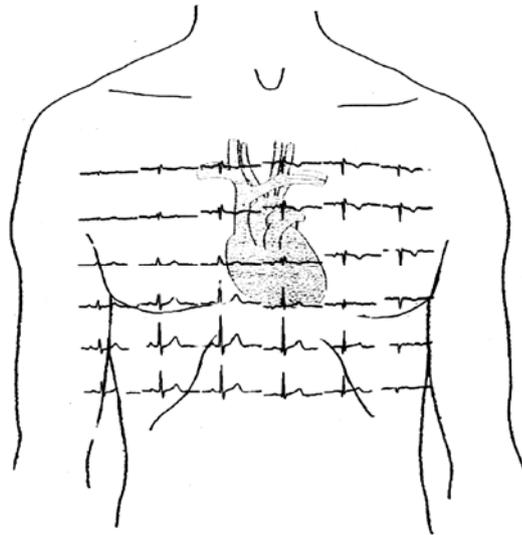


Рис.18. Кривые в прямоугольных ячейках представляют собой усредненные МКГ-сигналы электронного градиометра, измеренные в 36 точках (сетка 6 x 6) над торсом пациента. В каждой точке МКГ-сигнал усреднялся в течение 30 секунд.

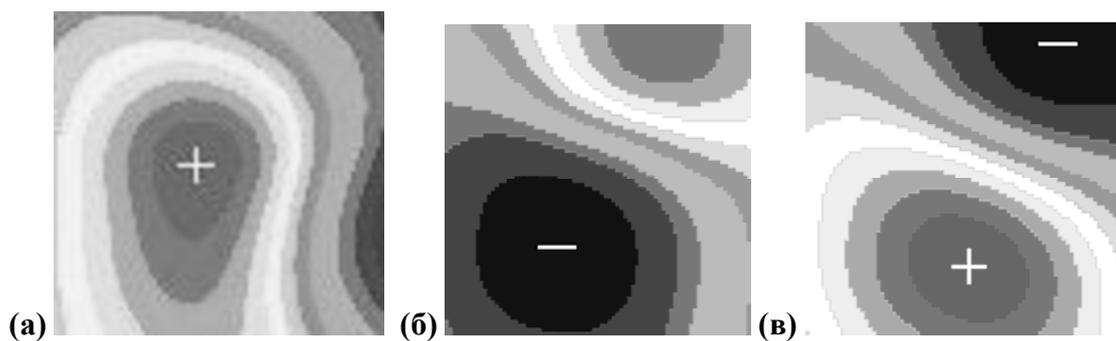


Рис.19. Распределение магнитного поля по области сканирования в моменты (а) R-, (б) S- и (в) T-пигов.

Суммарное время измерений по всем точкам составляло около 30 минут. Магнитометры демонстрировали стабильную работу и отсутствие изменений в шумовых характеристиках в

течение всего времени измерений. Это позволило получить с хорошим разрешением и воспроизводимостью 2D-распределение магнитного поля сердца (рис.19). Представленные на рис.19 эквииндукционные карты 2D-распределения магнитного поля были получены на основе представленных на рис.19 результатов измерений с использованием интерполяции значений магнитного поля методом минимальной кривизны поверхности. Обнаружено, что измеренный с помощью электронного ВТСП градиометра первого порядка МКГ-сигнал слабее спадает к периферии области сканирования по сравнению с соответствующими данными, полученными с помощью НТСП градиометрической системы второго порядка [40].

3.1. Измерительная система для магнитоэнцефалографии

Магнитоэнцефалографии (МЭГ) является неинвазивным методом, который дополняет другие функциональные методы визуализации деятельности головного мозга и несёт ценную информацию о динамике нейронной активности живого мозга человека с превосходным (порядка миллисекунды) временным разрешением. Некоторые из магнитных полей, которые были измерены с помощью МЭГ вызваны активностью коры головного мозга и имеют характерные амплитуды в диапазоне нескольких сотен фемтотесла. МЭГ является методом дополняющим электроэнцефалографию, в том смысле, что обе технологии имеют разную чувствительность к различной ориентации нейронных токов.

Чувствительными элементами МЭГ систем в настоящее время служат НТСП СКВИДы, охлаждаемые жидким гелием. Однако высокая стоимость жидкого гелия и неудобства его использования для охлаждения датчиков представляют собой препятствия, мешающие более широкому использованию МЭГ системы в клинической практике. Кроме того, в соответствии с американским законодательным актом ("Helium Privatization Act of 1996") запасы гелия в национальных подземных хранилищах Cliffside (Amarillo, Texas, USA), составляющие половину мировых запасов гелия стремительно сокращаются, и ожидается резкий рост его цены после 2015 года [41, 42]. Эти проблемы указывают на необходимость разработки датчиков магнитного поля, которые представляли бы собой альтернативу охлаждаемым гелием НТСП СКВИДам в системах регистрации МЭГ.

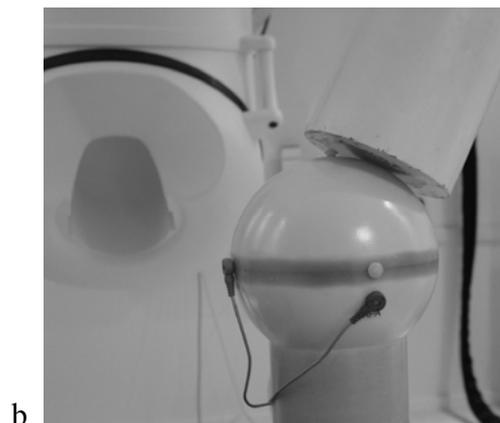
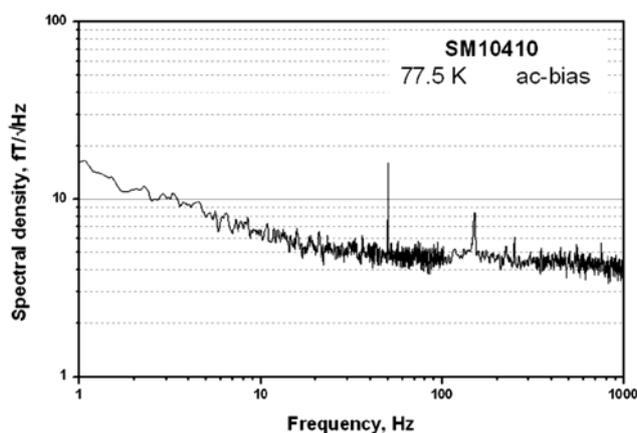
Датчики для применения в МЭГ должны иметь разрешение по магнитному полю не хуже $10 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и размер приемной катушки менее 20 мм. Однослойные ВТСП-СКВИДы [43, 44], с собственными шумами значительно превышающими $10 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 77.5 К были ранее испробованы для записи сигналов МЭГ. Как была отмечалось в [44], для достижения отношения сигнал-шум около 3 оказалось необходимым проведение около 2000 усреднений сигнала МЭГ

вызванного периодическими звуковыми импульсами. В результате время измерения МЭГ с такими датчиками получилось неприемлемо долгим для практики.

На многослойных ВТСП СКВИД магнитометрах постоянного тока (ПТ-СКВИДах) с 16-мм приемной катушкой и 12-витковой входной катушкой тонкопленочного ВТСП трансформатора потока было продемонстрировано разрешение по магнитному полю около $4 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 77 К [45]. Такие датчики в принципе могли бы послужить заменой НТСП СКВИДам в измерительных системах для МЭГ. Такая замена позволила бы сделать МЭГ системы независимыми от поставок гелия, удобнее для пользователей и сэкономить около 100 000 евро в год на эксплуатационных расходах каждой системы. В этом разделе описывается тестирование многослойных ВТСП СКВИД магнитометров для МЭГ при непосредственном сравнении с измерениями проведенными с использованием коммерческой МЭГ системы на НТСП СКВИДах [46].

Изготовленные согласно приведенному в [4] описанию 16-ти миллиметровые ВТСП СКВИД магнитометры были расположены на вставке в полуторалитровом азотном стеклопластиковом криостате производства НПО «КРИОТОН». Для измерений использовались ВТСП и НТСП системы с разрешением по магнитному полю около $5 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и рабочими температурами, соответственно, 77 К и 4.2 К. Работа ВТСП СКВИДов обеспечивалась СКВИД электроникой с переменным током смещения (НПО «КРИОТОН») что позволило уменьшить в 3 раза низкочастотные шумы вызванные флуктуациями критического тока джозефсоновских переходов. Спектральная плотность собственных шумов ВТСП системы измеренная с ВТСП СКВИДом помещенным в ВТСП экран представлена на рис. 20(а). Расстояние между приемной катушкой сигнального магнитометра и дном криостата составляла около 19 мм для НТСП системы и около 15 мм для ВТСП системы. Измерения были проведены в магнитно-экранированной комнате с использованием одноканальной ВТСП системы и коммерческой 248-канальной МЭГ-системы “Magnes[©] 3600 WH” фирмы 4D-Neuroimaging. Аналоговый выход ВТСП системы был присоединен ко входу 16-битного цифро-аналогового преобразователя имеющегося на НТСП системе и обрабатывался аналогично сигналу НТСП СКВИДов.

Сначала были проведены измерения с макетом головы содержащем калиброванные токовые диполи в солевом растворе. Фотография снятая в процессе измерения ВТСП системой на макете и с НТСП системой на заднем плане представлена на рис. 20(б).

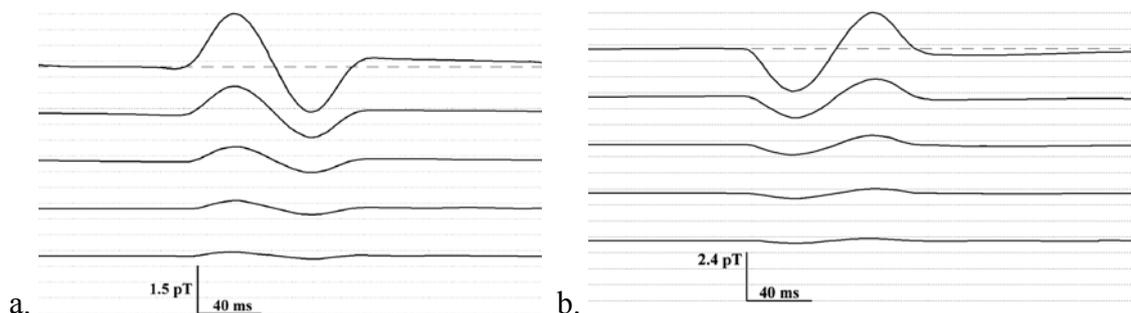


a.

b.

Рис. 20. (а) Спектральная плотность собственных шумов ВТСП системы измеренная с ВТСП СКВИДом помещенным в ВТСП экран; (b) фотография снятая в процессе измерения ВТСП системой на макете головы и с НТСП системой на заднем плане.

На рис. 21(а) представлены результаты измерений на макете НТСП системой, а на рис. 21(б) представлены результаты измерений НТСП системой полученные в тех же точках на поверхности макета головы.



a.

b.

Рис. 21. Результаты измерений магнитного поля от заполненного солевым раствором макета головы, полученные с помощью: (а) НТСП СКВИДа и (б) ВТСП СКВИДа.

Представленные на рис. 21 измерения были выполнены с амплитудами возбуждения токового диполя в два раза для каждой последующей записи. Для НТСП системы пиковые значения амплитуды магнитного поля составляли, соответственно, 3.2 пТ, 1.6 пТ, 800 фТ, 400 фТ and 200 фТ. Для получения сравнимых результатов компенсация шумов для обеих систем не производилась. Данные, полученные с помощью как НТСП так и ВТСП систем были чисто магнитометрическими, были результатом усреднения по 100 измерениям и отфильтрованы полосовым фильтром в диапазоне частот от 3 до 30 Гц.

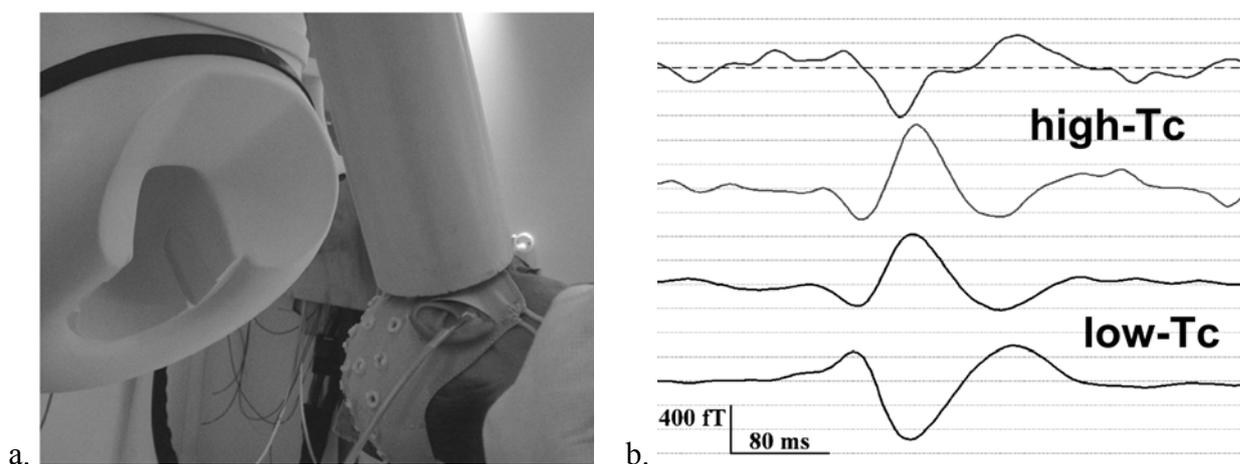


Рис. 22. (а) Фотография снятая во время измерения МЭГ с помощью ВТСП системы; (б) результаты измерения МЭГ ВТСП СКВИДом (две верхние кривые) и НТСП СКВИДами (две нижние кривые).

Фотография снятая во время измерения МЭГ с помощью ВТСП системы представлена на рис. 22(а). На рис. 22(б) показано сравнение данных полученных в один день с использованием ВТСП и НТСП систем в двух точках расположенных на расстоянии несколько сантиметров друг от друга. Все данные были получены со частотой и полосой считывания 678 Гц и 200 Гц, соответственно, и усреднены по 300 сигналам.

Измерения представленные на рис. 21 и 22 демонстрируют достаточную чувствительность 16-ти миллиметровых ВТСП СКВИД магнитометров работающих при 77 К для МЭГ измерений с относительно небольшим количеством усреднений и коротким временем считывания. Несмотря на то что эти ВТСП магнитометры по размеру значительно меньше 21-ти миллиметровых магнитометров коммерческой системы для МЭГ фирмы Elekta Neuromag[®] они показали аналогичную чувствительность по магнитному полю [45]. Использование меньшего числа радиационных экранов в азотном криостате привело к меньшим магнитным шумам, которые часто превосходят собственные шумы НТСП СКВИДов [47]. Тепловые магнитные шумы магнито-экранированной комнаты [47] также могут увеличивать шумы измерительной системы, уменьшая, таким образом, разницу между разрешением по магнитному полю двух систем. Более тонкая теплоизоляция азотного криостата позволяет расположить датчики более близко к объекту, что также способствует увеличению отношения сигнал/шум данных, полученных с помощью ВТСП МЭГ системы. Тем не менее, желательно дальнейшее улучшение чувствительности ВТСП СКВИДов при условии сохранения их пространственного разрешения и малого взаимовлияния датчиков во многоканальных системах.

Разрешение по магнитному полю индуктивносвязанного с многооборотной входной катушкой сверхпроводящего трансформатора потока может быть оценена по формуле:

$$B_N = \frac{L_{pu} + L_i}{kA_{pu} \sqrt{L_i L_S}} S_{\Phi}^{1/2}, \quad (5)$$

где A_{pu} и L_{pu} – площадь и индуктивность приемной петли трансформатора потока, k – коэффициент связи между СКВИДом и входной катушкой трансформатора потока, а S_{Φ} – белый шум по потоку СКВИДа. S_{Φ} определяется главным образом тепловыми флуктуациями в джозефсоновских переходах, максимальным откликом по напряжению на магнитный поток $|\partial V/\partial \Phi|$ и шумом предусилителя $S_{Ve} \approx (0.2 \text{ нВ})^2$:

$$S_{\Phi} = S_V / \left(\frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2 \approx \left\{ \frac{12k_B T}{R_N} \left[\frac{R_N^2}{2} + \frac{L_s^2}{4} \left(\frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2 \right] + S_{Ve} \right\} / \left(\frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2, \quad (6)$$

где R_N – нормальное сопротивление джозефсоновских переходов, а k_B – постоянная Больцмана.

В принципе, уровень белого шума ВТСП СКВИДов может быть уменьшен, например, с использованием последовательных цепочек СКВИДов, в \sqrt{N} раз где N – число СКВИДов в цепочке. При достаточно больших N и достаточно большой приемной петле разрешение ВТСП СКВИД магнитометров может достичь значений меньше 1 фТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при 77.5 К. По нашим оценкам согласно уравнениям (5) и (6) разрешение 1 фТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при 77.5 К может быть достигнуто при последовательном соединении двух СКВИДов ($N = 2$), диаметром приемной петли многовиткового трансформатора потока 30 мм и индуктивностью петли СКВИДа от 40 пГн до 80 пГн.

Последовательное соединение двух ПТ-СКВИДов в комбинации двойного СКВИДа представляет собой первый шаг к применению ВТСП ПТ-СКВИД цепочек [48]. При тестировании схемы двойного СКВИДа мы наблюдали удвоение модуляционного сигнала СКВИДа и уменьшение шумов по сравнению с характеристиками единичного СКВИДа при аналогичных размерах СКВИДа и параметрах джозефсоновских переходов. Две петли двойного СКВИДа могут быть индуктивно связаны с многослойными приемными катушками трансформатора потока для обеспечения улучшенной чувствительности датчика к магнитному полю [4]. Мы ожидаем, что применение сигнала модуляции непосредственно к прямосвязанной петле двойного СКВИДа уменьшит связь между датчиками в сравнении со случаем приложения сигнала к приемной петле

СКВИД-магнитометров. Дальнейшие эксперименты с многоканальными ВТСП МЭГ системами требуются для того чтобы определить насколько мало взаимодействие между ВТСП ПТ-СКВИД магнитометрами в условиях их близкого расположения.

Заключение

Разработаны и исследованы измерительные системы на основе ВТСП ПТ-СКВИДов, предназначенные для неразрушающего контроля материалов и конструкций, для магнитной микроскопии, геомагнитных и биомагнитных исследований. Продемонстрирована применимость данных систем для поставленных задач. Качественные магнетокардиограммы и магнетозэнцефаллограммы были получены с помощью аксиального электронного градиометра на основе 16-ти миллиметровых ВТСП ПТ-СКВИД магнитометров. Полученные значения отношения сигнал/шум оказались одного порядка со значениями полученными при помощи низкотемпературных систем. Это открывает возможность повышения рабочей температуры до 77 К для данных измерительных СКВИД систем широкого применения.

Работа поддержана грантами РФФИ, Министерством образования и науки, грантом Президента России для ведущих научных школ НШ-2456.2012.2

Литература

1. Clarke J. "SQUIDS for everything". *Nature Materials*, Vol. 10, 262–263 (2011).
2. Fagaly R. L. (2006). Superconducting quantum interference device instruments and applications, *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 77, 101101(45).
3. Faley M. I., Poppe U., Urban K., Paulson D. N., Starr T., & Fagaly R. L. Low noise HTS dc-SQUID flip-chip magnetometers and gradiometers, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.11, No.1, pp.1383-1386 (2001).
4. Фалей М. И. Магнитометры и градиометры на основе гетероструктур оксидных сверхпроводников // *Радиотехника и Электроника*. - 2005.- Т.50, №3.- С1-8.
5. Faley M. I., Poppe U., Urban K., Zimmermann E., Glaas W., Halling H., Bick M., Paulson D. N., Starr T., and Fagaly R. L. "Operation of the HTS dc-SQUID Sensors in High Magnetic Fields" *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.9, No.2, pp.3386-3391 (1999).
6. http://www.tristantech.com/prod_geomagnetic.html

7. Krause H. -J. , Wolf W., Glaas W., Zimmermann E., Faley M. I., Sawade G., Mattheus R., Neudert G., Gampe U., Krieger J. “SQUID Array For Magnetic Inspection of Prestressed Concrete Bridges”, *Physica C: Superconductivity*, Vol.368, No.1-4.- P.91-95 (2002).
8. Krause H.-J., Zhang Y., Hohmann R., Grünekle M., Faley M.I., Lomparski D., Maus M., Bousack H., Braginski A.I. „Eddy Current Aircraft Testing with Mobile HTS-SQUID Gradiometer System“, *Inst.Phys.Conf.Ser.*, No.158, p.775 (1997).
9. Valentino, M., Ruosi, A., Peluso, G., & Pepe, G. P.. Structural health monitoring of materials by high critical temperature SQUID, *Physica C*, Vol.372-376, No.1, pp.201-208 (2002).
10. Daibo M., Shikoda A., & Yoshizawa M. “Non-contact evaluation of semiconductors using a laser SQUID microscope”, *Physica C*, Vol.372–376, No.1, pp.263–266 (2002) .
11. Daibo M., & Kamiwano D. “Examination of relationship between resistivity and photocurrent induced magnetic field in silicon wafers using laser SQUID”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.15, No. 2, pp. 684-687 (2005).
12. Watanabe T., Watanabe S., Ikeda T., Kase M., Sasaki Y., Kawaguchi T., & Katayama T. “A prototype of a highly sensitive cryogenic current comparator with a HTS SQUID and HTS magnetic shield”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.17, pp.S450–S455 (2004).
13. Watanabe T., Fukunishi N., Sasaki Y., Kase M., Goto A., & Kamigaito O. “Development of beam current monitor with high- T_c SQUID at RIBF”, Proceedings of Beam Instrumentation Workshop (BIW10), La Fonda on the Plaza Santa Fe, New Mexico, USA, May 2-6, 2010, Invited talk, 10 pages. (2010).
14. Faley M. I., Poppe U., Slobodchikov V. Yu., Maslennikov Yu. V., and Urban K. “HTS dc-SQUID planar Gradiometer Measurement System for routine Inspections”, *Superconductor Science and Technology*, Vol.17, P.S301-S304 (2004).
15. Koch R. H., Foglietti V., Rozen J. R., Stawiasz K. G., Ketchen M. B., Lathrop D. K., Sun J. Z., and Gallagher W. L. „Effects of radio frequency radiation on the dc SQUID”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.65, No.1, pp.100-102 (1994).
16. Varpula T. and Poutanen T. “Magnetic field fluctuations arising from thermal motion of electric charge in conductors”, *J. Appl. Phys.*, Vol.55, No.11, pp.4015-4021 (1984).
17. Kasai N., Sasaki K., Kiryu S., and Suzuki Y. “Thermal magnetic noise of dewars for biomagnetic measurements” *Cryogenics*, Vol.33, pp.175-179 (1993).
18. Zimmerman J.E. and Mercereau J.E. “Quantized Flux Pinning in Superconducting Niobium” *Phys. Rev. Lett.*, Vol.13, No.4, pp.125-126 (1964).
19. Снигирев О. В. „Сверхчувствительная сквид-магнитометрия“, *Успехи Физических Наук*, Том 169, №2, с.221-223 (1999).

20. Tsuei C.C. , Kirtley J.R., Chi C.C., Yu-Jahnes L.S., Gupta A., Shaw T., Sun J. Z., and Ketchen M. B. „Pairing Symmetry and Flux Quantization in a Tricrystal Superconducting Ring of YBa₂Cu₃O_{7-d}“, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.73, No.4, pp.593-596 (1994).
21. Kirtley J.R., Tsuei C.C., Sun J.Z., Chi C.C., Yu-Jahnes L.-S., Gupta A., Rupp M., Ketchen M.B. „Symmetry of the order parameter in the high-T_c superconductor YBa₂Cu₃O_{7-d}“, *Nature*, Vol.373, No.6511, pp.225-228 (1995).
22. Snigirev O.V., Andreev K.E., Tishin A.M., Gudoshnikov S.A., and Bohr J. “Magnetic properties of thin Ni films measured by a dc SQUID-based magnetic microscope” *Phys. Rev. B.*, Vol.55, No.21, pp.14429-14433 (1997).
23. Снигирев О.В., Тишин А.М., Гудошников С.А., Андреев К.Е., и Бор Я. „Магнитные свойства ультратонких пленок Ni“, *Физика твердого тела*, Том 40, №9, с.1681-1685. 1998).
24. Kirtley J.R. “SQUID microscopy for fundamental studies”, *Physica C*, Vol.368, pp.55–65. 2002.
25. Fleet E.F., Chatrathorn S., Wellstood F. C., Knauss L. A., Green S. M. “Closed-cycle refrigerator-cooled scanning SQUID microscope for room-temperature samples”, *Review of Scientific Instruments*, Vol.72, No.8.- pp.3281-3290 (2001).
26. Bondarenko S.I. “Ferromagnetic fluxgate for measurement of weak magnetic field structure with use of HTSC-SQUID”, *Proceedings of ICEC 16/ICMC*, part 2, pp.1177-1180 (1996).
27. Bondarenko S.I. Shablo A.A. “High-T_c SQUIDs with a ferromagnetic antenna for a magnetic microscope”, in: *Non-linear electromagnetic systems*, Kose V., Sievert J., editors. Amsterdam: 105 Press, pp.91-104 (1998).
28. Pitzius P., Dworak V., Hartmann U. “Ultra-high Resolution Scanning SQUID Microscope”, *Extended Abstract of the 6th Int. Supercond. Electr. Conf., ISEC'97*, Berlin, Germany, pp.395-398 (1997).
29. Gudoshnikov S.A., Liubimov B.Ya., Matveets L.V., Mikhalenko A.P., Deryuzhkina Yu.V., Sitnov Yu.S., Snigirev O.P. Flux guide for high-T_c SQUID microscope with high spatial resolution // *Physica C*.- 2002.- V.368.- P.66-69.
30. Gudoshnikov S.A., Liubimov B.Ya., Matveets L.V., Snigirev O.P. Maresov A.G., Prokoshin A.F., Borisov V.T., Usov N.A. Study of amorphous ferromagnetic microwires using a scanning SQUID microscope // *Physica C*.- 2002.- V.376.- P.271-276.
31. Poppe U., Faley M. I., Breunig I., Speen R., Urban K., Zimmermann E., Glaas W., and Halling H. HTS dc-SQUID Microscope with soft-magnetic Flux Guide // *Superconductor Science and Technology*.- 2004.- V.17, P.S191-S195.
32. Faley M. I., Pratt K., Reineman R., Schurig D., Gott S., Sarwinski R. E., Paulson D. N., Starr T. N., and Fagaly R. L., HTS dc-SQUID Micro-Susceptometer for Room Temperature Objects // *Superconductor Science and Technology*.- 2004.- V.17.- P.S324-S327.

33. Jungbluth B. Simulationen und Experimente zur Optimierung eines hochpermeablen Magnetfeldleiters für den Einsatz in einem SQUID-Mikroskop // Diplomarbeit in Physik, Jülich.- 2000.
34. Roozenboom F., Bloemen P.J.H., Klaassens W., van de Riet E.G.J., and Donkers J.J.T.M. Soft-magnetic fluxguide materials // Philips J. Res.- 1998.- V.51, No.1.- P.59-91.
35. Vitale S., Prodi G.A., Cerdonio M. Thermal magnetic noise in rf SQUIDS coupled to ferromagnetic cores // J. Appl. Phys.- 1989.- V.65, No.5.- P.2130-2136.
36. Chatrathorn S., Fleet E.F., and Wellstood F.C. Relationship between spatial resolution and noise in scanning superconducting quantum interference device microscopy // Journal of Applied Physics.- 2002.- V.92, No.8.- P.4731-4740.
37. Vu L.N. and Van Harlingen D.J. Design and implementation of a scanning SQUID microscope // IEEE Transactions on Applied Superconductivity.- 1993.- V.3, No.1.- P.1918-1921.
38. Lant J., Stroink G., ten Voorde B., Horacek M., Montague T.J. Complementary nature of electrocardiographic and magnetocardiographic data in patients with ischemic heart disease // Journal of Electrocardiology.- 1990.- V.23, No.4.- P.315-322.
39. Faley M. I., Poppe U., Urban K., Slobodchikov V. Yu., Maslennikov Yu. V., Gapelyuk A., Sawitzki B., and Schirdewan A. Operation of high-temperature superconductor magnetometer with submicrometer bicrystal junctions // Appl.Phys.Lett.- 2002.- V.81, No.13.- P.2406-2408.
40. Gapelyuk A., Copetti C.A., Schirdewan A., Schutt H., Wiedemann M., Meyerfeldt U., Primin M. A., Maslennikov Yu.V. Invasive evaluation of MCG-localization results: importance of measured electrophysiological time intervals // Biomag 96: Proceedings of the Tenth International Conference on Biomagnetism, C. J. Aine, Y. Okada, G. Stroink, S. J. Swithenby, C. C. Wood (eds.), New York: Springer-Verlag.- 2000.- V.2.- P.464-466.
41. Witchalls C. One minute with... Robert Richardson. The New Scientist. 2010;207, Issue 2773, 14 August, Page 29;
42. Witchalls C. Nobel prizewinner: We are running out of helium. New Scientist. 18 August 2010.
43. Zhang Y, Tavrín Y, Mück M, Braginski AI, Heiden C, Hampson S et al. Magnetoencephalography Using High Temperature rf SQUIDS. Brain Topography, 1993;5(4):379-382.
44. Barthelmess H, Halverscheid M, Schiefenhövel B, Heim E, Schilling M, Zimmerman R. HTS-Multichannel-System for Magnetocardiography and Magnetoencephalography. BIOMAG 2000 Conference 2001;927-930.
45. Faley MI, Jia CL, Poppe U, Houben L, and Urban K. Meandering of the grain boundary and d-wave effects in high-Tc bicrystal Josephson junctions. Superconductor Science and Technology 2006;19:S195-S199.

46. M.I.Faley, U.Poppe, R.E.Dunin-Borkowski, M.Schiek, F.Boers, H.Chocholacs, J.Dammers, E.Eich, N.J.Shah, A.B.Ermakov, V.Yu.Slobodchikov, Yu.V.Maslennikov, and V.P.Koshelets “Magnetoencephalography using a multilayer high-T_c DC SQUID magnetometer”, *Physics Procedia* **27** (2011).
47. Nenonen J, Montonen J, and Katila T. Thermal noise in biomagnetic measurements, *Rev.Sci.Instrum.*, 1996; 67(6): 2397-2405.
48. Chen KL, Yang HC, Ko PC, Horng HE. Characterization of dual high transition temperature superconducting quantum interference device first-order planar gradiometers on a chip, *J Appl Phys*, 2010;108:064503(4).
49. Faley M. I. “Epitaxial oxide heterostructures for ultimate high-T_c quantum interferometers”, Chapter in book “Applications of High-T_c Superconductivity”, ISBN 978-953-307-308-8, Edited by Adir Luiz, *InTech*, Rijeka, Croatia, pp.147-176 (2011).
50. Фалей М. И. и Масленников Ю. В. Сверхпроводниковая измерительная система для обнаружения магнитных примесей в конструкционных материалах // *Радиотехника и Электроника*.- 2005.- Т.50, №6.- С759-765.
51. Фалей М. И. и Масленников Ю. В. Чувствительная магнито-кардиографическая измерительная система с рабочей температурой 77 К // *Биомедицинские Технологии и Радиоэлектроника*.- 2004.- № 8-9.- С.82-87.